



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Islaster på konstruktioner

Burcharth, H. F.

Publication date:
2004

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Burcharth, H. F. (2004). *Islaster på konstruktioner*. (4. udg.) Aalborg Universitet.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**ISLASTER
PÅ KONSTRUKTIONER**

H.F. BURCHARTH

**4. udgave.
Februar 2004
Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning
Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik
AUC, Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg**

**ISLASTER
PÅ KONSTRUKTIONER**

H.F. BURCHARTH

**4. udgave.
Februar 2004
Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning
Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik
AUC, Sohngaardsholmsvej 57, 9000 Aalborg**

Forord

Dette kompendium giver kun en kort introduktion til bestemmelse af iskræfter på stive konstruktioner med relevans til i hovedsagen skandinaviske forhold.

Is er et særdeles kompliceret materiale, idet det er udpræget elasto-plastisk og anisotropt med store variationer i styrke og deformationsegenskaber. Ofte er isen desuden inhomogen. Sammenholdes dette med, at der for de fleste lokaliteter i bedste fald kun findes få målinger og bestemmelser af isens karakteristika følger det, at bestemmelse af islaster med en given overskridelsessandsynlighed er behæftet med overordentlig stor usikkerhed. Da islaster desuden ofte er store, betaler det sig at studere litteraturen grundigt og eventuelt udføre modelforsøg for at reducere lastusikkerheden. Nærværende fremstilling er i høj grad støttet på referencerne Christensen, 1989 og 1990.

Indhold

1	Isens struktur, styrke og deformationsegenskaber	1
1.1	Iskrystallet	1
1.2	Isens struktur, saltholdighed og temperatur	2
1.3	Isens massetæthed	6
1.4	Vands frysepunkt	6
1.5	Dannelse af is på vandoverflader	7
1.6	Tykkelse af havis	7
1.7	Isens deformationsegenskaber	10
1.8	Isens trykstyrke	13
1.9	Isens bøjningsstyrke	17
1.10	Isens Adhæsionsstyrke	18
1.11	Friktionskoefficient	18
1.12	Termisk volumenændring af is	18
2	Islasttyper og lastfrembringende kræfter	21
2.1	Oversigt over isens hovedformer, ydre lastfrembringende påvirkninger, islasttyper og islastbegrænsninger	21
2.2	Islastens karakter og afhængighed af konstruktionens geometri og stivhed	23
2.3	Islastens begrænsninger	25
2.4	Oversigt over typiske lasttilfælde	26
2.5	Strøm- og vindkræfter på is	29
2.6	Kræfter fra termisk volumenændring af is	33
3	Isbrudlast mod stive konstruktioner	37
3.1	Isbrudlast fra isflager og isdække på konstruktioner med lodret front	37
3.1.1	Smalle konstruktioner	37
3.1.2	Brede konstruktioner	40

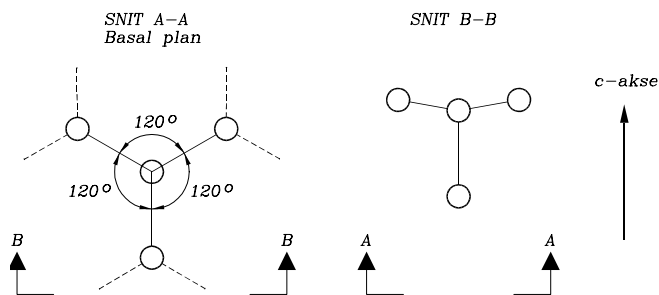
3.1.3	Konstruktioner med flere ben	41
3.2	Isbrudlast fra isflager og isdække på konstruktioner med skrå front	41
3.2.1	Smalle koniske konstruktioner	41
3.2.2	Brede koniske konstruktioner	45
3.2.3	Kileformede konstruktioner med hældende front	46
4	Isløftekræfter på pæle og vægge	50
4.1	Isløftekraft på lang lodret væg	50
4.2	Isløftekræfter på pæle og mindre konstruktioner	51
5	Referencer	53

Kapitel 1

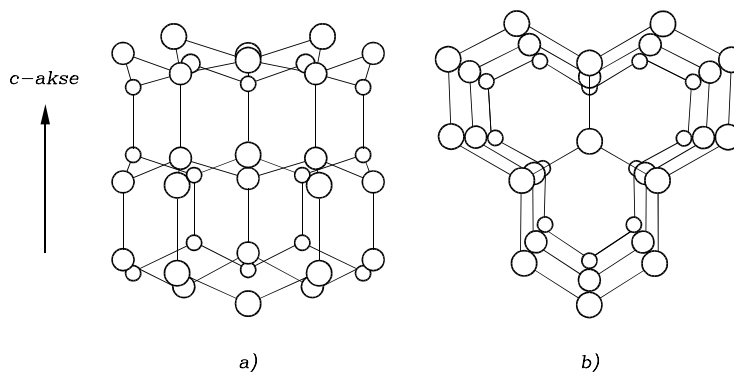
Isens struktur, styrke og deformationsegenskaber

1.1 Iskristallet

Iskristallet er anisotropt med store forskelle i deformations- og styrkeegenskaber i de forskellige retninger. Iskristallet er opbygget af iltatomer sammenholdt af hydrogenbindinger. Som vist på Fig. 1.1 er hvert molekyle omgivet af 4 andre molekyler med en bestemt indbyrdes placering. Molekyleplaceringen angives ud fra det såkaldte *basalplan* og den derpå vinkelret stående såkaldte *c-akse*.



Figur 1.1: Basiselement i krystalgitter. Definition af basalplan og c-akse. Basalplanet er vinkelret på c-aksen (fra Michel, 1978).



Figur 1.2: Iskrystalstruktur. a) set vinkelret på c-akse, b) set parallel med c-akse (fra Michel, 1978).

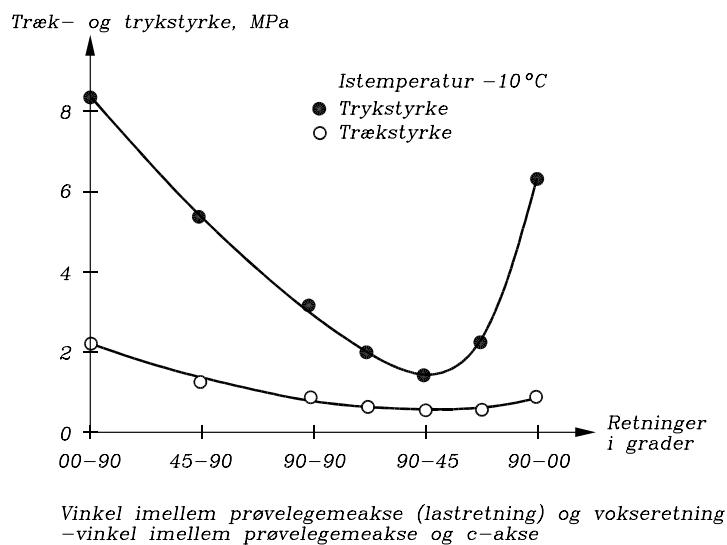
Fig. 1.2 viser et iskrystal eller en del af et iskrystal. Typisk størrelse af iskrystaller er 2 - 50 mm, men krystaller op til 1 m eksisterer.

Iskrystallet har de mindste træk- og trykstyrker og er lettest deformerbart i c-aksens retning.

1.2 Isens struktur, saltholdighed og temperatur

Såfremt krystalstørrelsen er ensartet og c-akserne orienteret tilfældigt, benævnes isen *isotrop*.

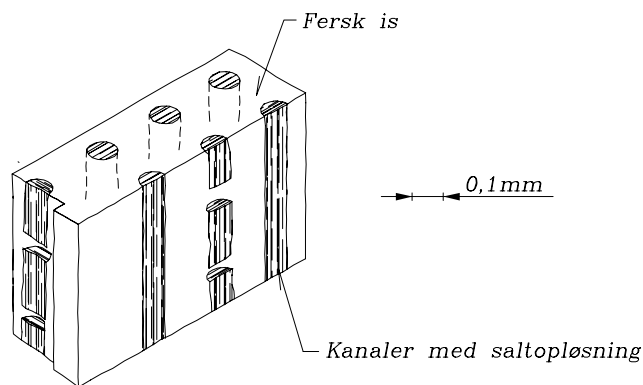
Imidlertid vokser iskrystallet ved frysning hurtigere i basalplanets retning end i c-aksens retning. Dette medfører for is der dannes ved havoverfladen en favorisering af krystaller, som ligger med horisontal c-akse. Efter 5 til 20 centimeters isvækst er c-aksen stort set horisontal. Krystallerne bliver dermed langagtige i vertikal retning og isen siges at have *søjlestruktur*. Isen er således anisotrop. Fordelingen af krystallernes c-akse i horisontalplanet er dog næsten tilfældig, hvorfor isen stort set kan antages isotrop i basalplanet. Den store forskel i krystalgitterstrukturen i c-aksens og basalplanets retninger bevirker stærkt varierende isstyrker ved varierende lastretninger. Fig. 1.3 illustrerer dette forhold. Bemærk i øvrigt, at trykstyrken er 3 til 4 gange større end trækstyrken.



Figur 1.3. Typisk eksempel på variationen af gennemsnitlige træk- og trykstyrker med lastretningen (fra Peyton, 1966).

I det følgende tages ikke hensyn til anisotropien, idet alle angivne styrke- og deformationsegenskaber er henført til horisontal lastretning, dvs., at tryk- og trækstyrker henfører til horisontale spændingsvektorer og bøjningsstyrker til bøjning omkring horisontale akser.

Is indeholder sædvanligvis luftlommer. Is dannet i saltvand indeholder desuden lommer med stærkt saltholdigt vand, Fig. 1.4.

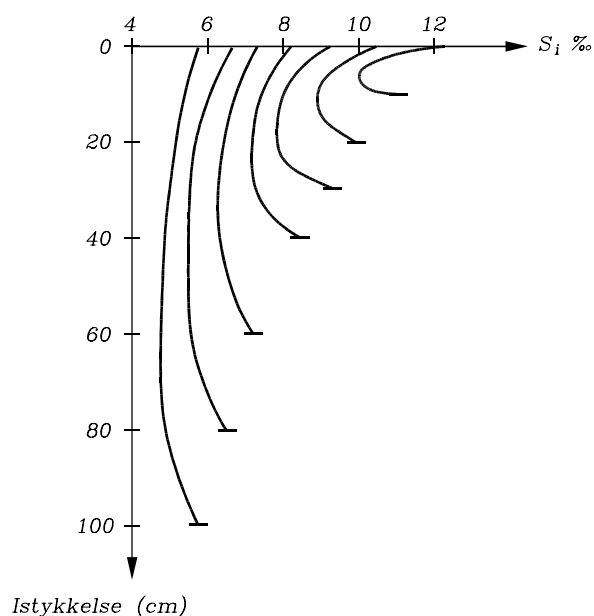


Figur 1.4. Udsnit af havis (efter Assur, 1958).

Selve isen er fersk, idet havvandssaltet udskilles ved frysningen. Isens ret pludselige dannelse medfører, at saltopløsning indesluttet i lommer og kanaler. Efterhånden som isen afkøles koncentrerer saltopløsningen, idet lommerne mindskes. Først når frysepunktet for mættet saltopløsning nås ved -21°C , opnår isen sin fulde styrke, idet isen da er gennemfrosset.

Tilstedeværelsen af luft- og saltopløsningslommer svækker isen. Jo hurtigere isen er dannet og jo yngre isen er, jo større er indholdet af lommer.

Straks efter isens dannelse begynder en dræning af saltopløsning ned igennem kanalerne. Dette medfører en variation af gennemsnitssaltholdigheden ned gennem isen samt at isen bliver ferskere med tiden. Saltholdigheden i is dannet af havvand, hvor saltholdigheden S_i maksimalt er ca. 35‰ , er sjældent over 15‰ og da kun ved nydannet is. Fig. 1.5 viser et typisk eksempel på saltholdighedsvariationen målt i havis under dannelse.



Figur 1.5. Serie af typiske saltholdighedsprofiler i havis under dannelse. Fra Weeks og Assur (1967).

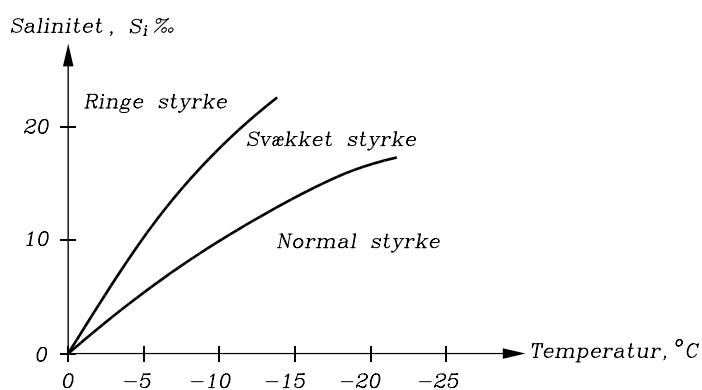
Tabel 1.1 viser saltindholdet S_i (middel over totalvolumen) i isprøver udtaget i indre danske farvande og i den Botniske bugt.

Tabel 1.1. Saltholdighed S_i af is i Skandinavien (Christensen 1990).

Lokalitet	middel	standardafvigelse	min.	max
Indre danske farvande	1,69 ‰	0,95 ‰	0,8 ‰	3,5 ‰
Botniske bugt	1,85 ‰	1,00 ‰	0,0 ‰	3,78 ‰

Isens styrke vokser med aftagende temperatur og mindskes med voksende saltholdighed. Fig. 1.6, der kan opfattes som en slags tilstandsdiagram for isens styrke, illustrerer disse forhold.

Idet isens temperatur normalt varierer over dybden, vil isens mekaniske egenskaber også variere over dybden. Imidlertid er det en almindelig tilnærmelse ved islastberegninger at betragte isen som et homogent isotropt materiale.



Figur 1.6. Skematisk illustration af styrkeforhold for havis.

Tabel 1.2 viser istemperaturen T_i (middel over dybde) for indre danske farvande og den Botniske bugt.

Tabel 1.2. Temperatur T_i af is i Skandinavien (Christensen 1990).

Lokalitet	middel	standardafvigelse	min.	max
Indre danske farvande	-1,88 °C	0,82 °C	-4,1 °C	-0,9 °C
Botniske bugt	-4,01 °C	1,87 °C	-10,0 °C	-1,0 °C

1.3 Isens massetæthed

Massetætheden for ren (fersk) is ved 0°C er $\rho_{io} = 916,6 \text{ kg/m}^3$ og lineært voksende til $920,7 \text{ kg/m}^3$ ved -30°C .

Indhold af luft og saltopløsning ændrer massetætheden som følger (Schwerdtfeger, 1963):

$$\rho_i = \rho_{io} \frac{(1 - \nu_a)}{1 - (1 - 4,56/T_i) S_i/1000} \quad \text{for} \quad -8^\circ\text{C} < T_i < T_f \quad (1.1)$$

hvor

ρ_{io}	$916,6 \text{ kg/m}^3$
ν_a	relativt volumen af luftbobler
S_i	issaltholdighed i ‰
T_i	istemperatur i (negative) $^\circ\text{C}$
T_f	vandets (isens) frysepunkt.

Eksempel:

$$\nu_a = 0,02, \quad S_i = 3^\circ_{\text{‰}}, \quad T_i = -4^\circ\text{C} \quad \text{giver} \quad \rho_i = 898 \text{ kg/m}^3$$

Isens massetæthed er således altid mindre end vandets, hvilket betyder, at isdannelse sker under volumenforøgelse.

1.4 Vands frysepunkt

Frysepunktet T_f falder med voksende saltindhold som følger:

$$T_f = 0^\circ\text{C} - \frac{1,3^\circ\text{C}}{24,7^\circ_{\text{‰}}} \cdot S_w \quad (1.2)$$

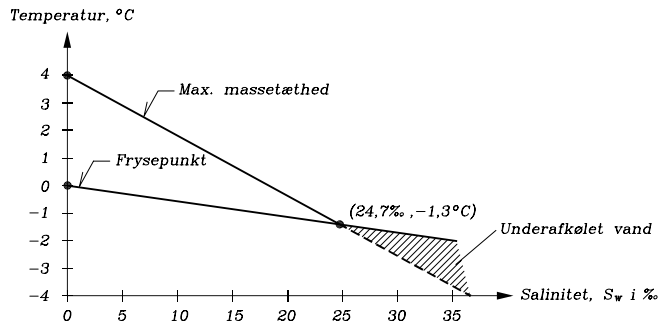
hvor vandets saltholdighed S_w indsættes i ‰.

Vandtemperaturen, hvor maximal massetæthed (densitet) optræder, er givet ved

$$T_{md} = 4^\circ\text{C} - \frac{5,3^\circ\text{C}}{24,7^\circ_{\text{‰}}} \cdot S_w \quad (1.3)$$

hvor S_w indsættes i ‰. Fig. 1.7 viser en afbildning af (1.2) og (1.3).

Læg mærke til, at for saltholdigheder mindre end $24,7^\circ_{\text{‰}}$ ligger frysepunktet under temperaturen for maximal massetæthed. For saltholdigheder over $24,7^\circ_{\text{‰}}$



Figur 1.7: Max massetæthed og frysepunkt for vand.

er det omvendt. Dette forhold influerer på vandcirkulationen og temperaturfordelingen under vandets nedkøling til frynsning.

Oceanernes saltindhold er ca. 35 ‰ svarende til et frysepunkt ved $-1,84^{\circ}\text{C}$.

Saltindholdet i de indre danske farvande er ofte omkring 16-20 ‰, men er ulige fordelt over dybden. Dette skyldes den lagdeling der optræder, når Østersøens brakvand møder det langt mere salte vand fra Skagerrak.

1.5 Dannelsen af is på vandoverflader

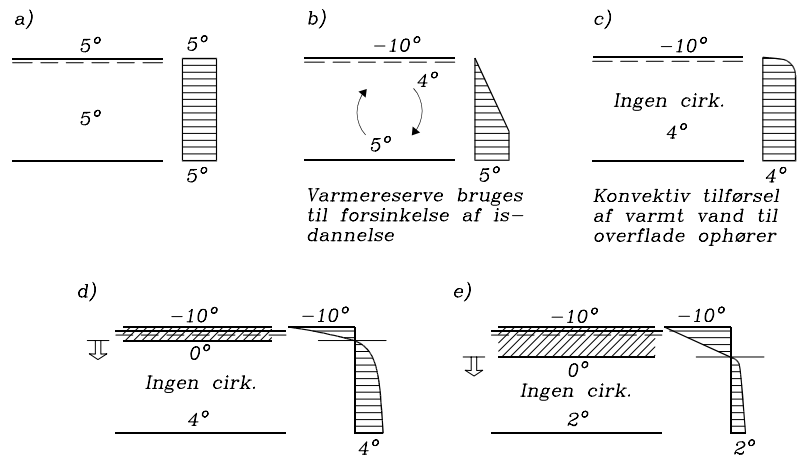
Det følger af afbildningen Fig. 1.7, at vandcirkulation og temperaturfordeling er forskellig ved isdannelse i fersk og salt vand. Figurerne 1.8 og 1.9 illustrerer dette forhold.

I havvand med salinitet over 24,7 ‰ vil cirkulationen og dermed opblanding af vandet fortsætte, indtil vandet over hele dybden er nedkølet til frysepunktet. Ved store vanddybder er varmereserven så stor, at der ikke sker tilfrysning.

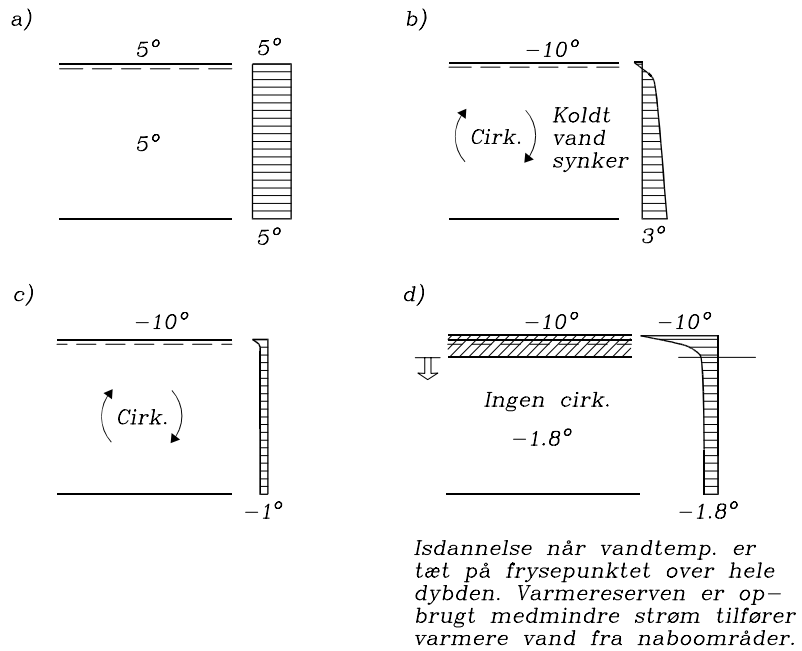
Såfremt der er lagdeling i havvandet i form af ferskere overfladelag, kan der ske tilfrysning selv om vanddybden er meget stor.

1.6 Tykkelse af havis

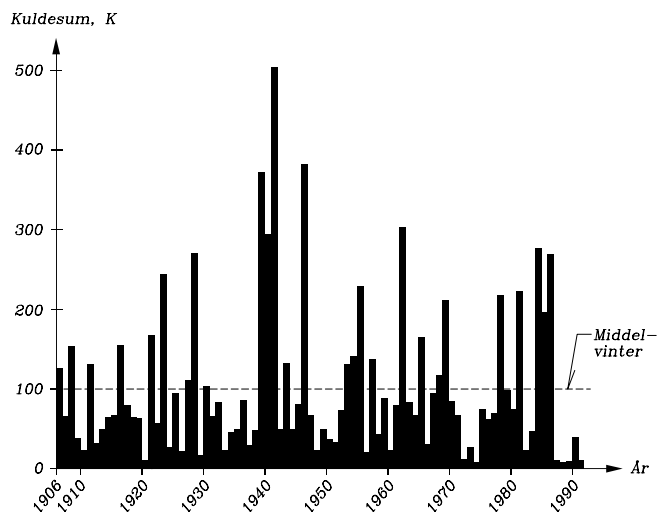
Isdannelsen i naturen er afhængig af en lang række faktorer, hvis korrelation og værdier sjældent er målt. Derfor baseres vurdering af istykkelse i almindelighed på måling af tykkelsen på den aktuelle lokalitet. Der eksisterer dog en simpel



Figur 1.8: Tilfrysning af ferskvandssø. Temperaturer i °C.



Figur 1.9: Isdannelse i havvand med saltholdighed $S_w > 24,7 \text{ ‰}$. Temperaturer i °C.



Figur 1.10: Kuldesummer for danske vintre 1907-1992 (Søfartsstyrelsen, Istjenesten.)

tilnærmet formel for istykkelsen, h . Formlen, der kan anvendes til orientering, såfremt målinger ikke findes, har formen

$$h = 0,03 \sqrt{K} \quad (\text{m}) \quad (1.4)$$

hvor K er den såkaldte *kuldesum*, som er produktet af antal frostdøgn (dvs. døgn hvor middeltemperaturen er under 0°C) og middeltemperaturen over disse døgn. Faktoren 0,03 har enheden $\text{m}/\sqrt{\text{antal døgn} \cdot ^\circ\text{C}}$.

For indre danske farvande anvendes ofte udtrykket

$$h = 0,03 \sqrt{K - 50} \quad (1.5)$$

hvor kuldesummen 50, der fratrækkes K , er medtaget for at tage højde for den kulde, der medgår til at nedkøle vandområderne til temperaturer i nærheden af frysepunktet, som er under 0°C . En vis kompensation for tøperioder i løbet af vinteren, hvor istykkelsen aftager, er også indeholdt. Fig. 1.10 viser kuldesummerne for danske vintre i perioden 1907-1992.

Værdierne er middelværdier for en række stationer fordelt over det danske område. Middelværdien for perioden er $K = 100$.

Eksempel:

For en middelvinter ($K = 100$) og en meget streng vinter ($K = 350$) beregnes istykkelsen af (1.5) til henholdsvis 0,21 m og 0,52 m.

Der regnes ofte med en istykkelse på 0,4 m ved dimensionering af simple konstruktioner i danske farvande. Istykkelsen varierer dog betydeligt for de forskellige lokaliteter. Lille saltholdighed, næsten ferske overfladelag, lille vanddybde, strøm- og bølgelæ medfører tidlig isdannelse og stor istykkelse.

Den Danske Norm (DS 410) fastsætter for is i danske farvande en karakteristisk middelstykkelse på $e = 0,6$ m svarende til middelhypighed for overskridelsen $n = 0,02$ gange pr. år. For andre værdier af n kan for $n < 1/3$ tykkelsen bestemmes af

$$e = 0,32 \sqrt{\ln \frac{1}{n} - 0,4} \text{ m} \quad (1.6)$$

Der er tilsyneladende ingen korrelation imellem istykkelse og isstyrke.

1.7 Isens deformationsegenskaber

Is opfører sig som et elastisk-plastisk materiale, hvor deformationskarakteristika har en kompliceret sammenhæng med deformationshastighed (tøjningshastigheden), temperatur og indhold af salt- og luftporer.

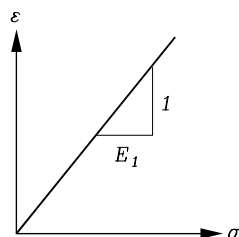
På grund af isens krybning ved belastning er det vanskeligt at definere en elasticitetsmodul (og et Poissons forhold). En såkaldt dynamisk elasticitetsmodul E_{dyn} kan bestemmes ved måling af ultralydshastigheden c i isen, idet $E_{dyn} \equiv \rho c^2$, hvor ρ er isens massetæthed.

De komplicerede deformationsegenskaber kan illustreres med følgende forenklede forklaring af isen som værende opbygget af elastiske og plastiske elementer:

Ved spændingsændringshastigheder større end ca. 0,05 MPa/sek reagerer isen nærmest som et elastisk materiale (fjederelement), der følger Hooke's lov,

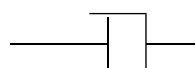
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \quad (1.7)$$

hvor elasticitetsmodulet, E_1 , for en given is antages konstant og tøjningen, ε , derfor vil være proportional med spændingen, σ_1 , jf. Fig. 1.11.



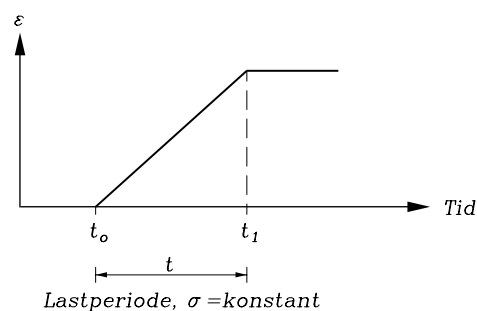
Figur 1.11. Illustration af deformation af elastisk materiale.

Ved meget langsomme spændingsændringshastigheder optræder isen nærmest som et viskøst materiale (dæmpningselement), hvor deformationsforholdene er givet ved



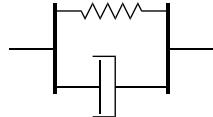
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\mu_1} \quad (1.8)$$

hvor μ_1 er dæmpningskonstanten. ε vil vokse lineært i belastningstiden for konstant σ , jf. Fig. 1.12.

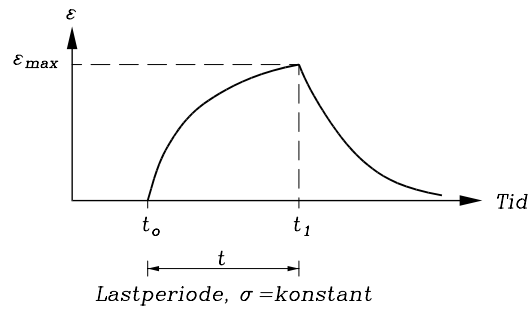


Figur 1.12. Illustration af deformation af viskøst materiale.

Forsøg med is viser, at både elastiske og plastiske deformationer optræder i lastperioden $t_o - t_1$. I lastperiodens begyndelse dominerer (1.7), men den plastiske deformation (1.8) vokser i lastperioden med den konsekvens, at isens tilsyneladende elasticitet aftager. Denne deformationsmodel kan modelleres som følger:



$$\sigma = \varepsilon E_2 + \mu_2 \dot{\varepsilon} \quad (1.9)$$



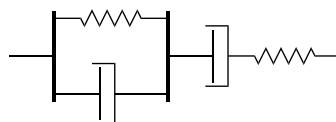
Figur 1.13. Illustration af deformation af visko-elastisk materiale.

Ligning (1.9) kan løses med hensyn til ε

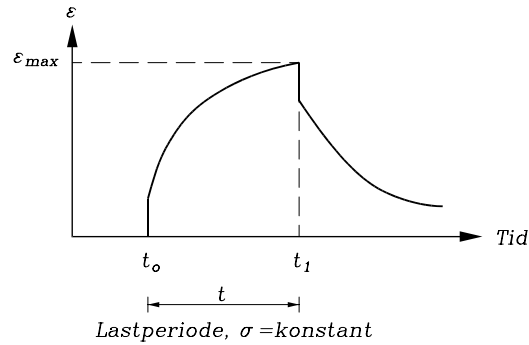
$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_2}{\mu_2} t \right) \right) \quad (1.10)$$

hvor t er lastperiodens varighed (hvor $\sigma = \text{konstant}$ er påført).

Ved siden af de her omtalte deformationsegenskaber har isen også plastiske egenskaber, som medfører blivende deformationer af et belastet emne. Endvidere reagerer isen ved aflastning (som ved belastning) også som et elastisk materiale. En mere komplet deformationsmodel er derfor opbygget som følger:



$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\mu_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - \exp \left(-\frac{E_2}{\mu_2} t \right) \right) \quad (1.11)$$



Figur 1.14. Illustration af deformation af is.

Isens plastiske egenskaber medfører krybning og dermed også med tiden udligning af spændinger opstået ved en termisk ekspansion.

Ren ferskvandsis har en dynamisk elasticitetsmodul på

$$E_{dyn} \simeq 9 \text{ GPa}$$

For *havis* med søjlestruktur (jf. afsnit 1.2) kan E , svarende til horisontallast, estimeres ud fra formelen

$$E_{dyn} \simeq (1 - 0,011T_i) \cdot 5,7 \text{ GPa}, \quad (1.12)$$

hvor T_i er istemperaturen i $^{\circ}\text{C}$ (negativ).

Ved en typisk istemperatur $T_i = -5^{\circ}\text{C}$ findes $E_{dyn} \simeq 6,0 \text{ GPa}$.

Poissons forhold, ν_P , defineret som forholdet imellem transversal og longitudinal (lastretning) tøjning, regnes ofte til 0,33, men værdier op til 0,5 er fundet for is med søjlestruktur.

1.8 Isens trykstyrke

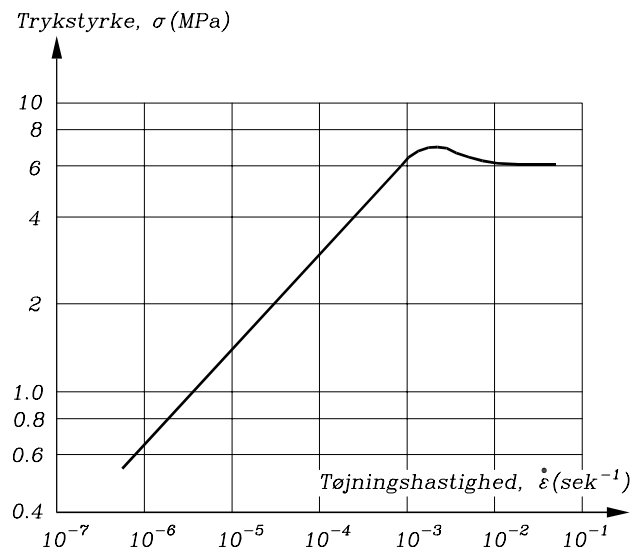
Trykstyrken, σ , afhænger af en række parametre, hvoraf følgende er de vigtigste:

- istype f.eks. overfladeis og gletsjeris (isbjerge)
- krystalstørrelse og -orientering

- luftindhold
- saltindhold (volumen af porer med saltopløsning)
- temperatur
- deformationshastighed ved lastpåførsel (strain rate)
- deformationsbegrænsninger (f.eks. i horisontalretning vinkelret på horisontal last)

Den generelle indflydelse på styrken af krystalstørrelse og -orientering samt luft- og saltindhold er omtalt i afsnit 1.1 - 1.2. Værdierne af disse parametre afhænger af isens dannelses- og lasthistorie, herunder isens alder.

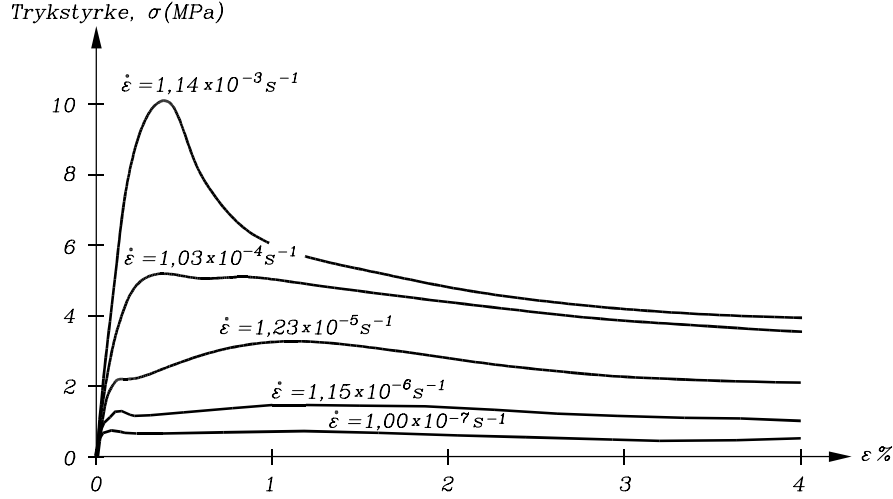
Deformationshastigheden (tøjningshastigheden $= \frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon}$) har stor indflydelse på isens styrke. Fig. 1.15 viser et typisk eksempel på trykstyrkens afhængighed af $\dot{\varepsilon}$.



Figur 1.15. Eksempel på tøjningshastighedens indflydelse på isens trykstyrke.

For $\dot{\varepsilon} \leq 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$ er der en næsten lineær sammenhæng med σ . For $\dot{\varepsilon} > 10^{-3} \text{ sek}^{-1}$ varierer σ kun lidt med $\dot{\varepsilon}$.

Fig. 1.16 giver et eksempel på typisk sammenhæng imellem trykstyrke, tøjning og tøjningshastighed.



Figur 1.16. Eksempel på typisk sammenhæng imellem enakset trykstyrke, tøjning og tøjningshastighed for is (fra Mellor og Cole, 1982).

For normal havvandsis angiver Timco et al. (1986) følgende formel for trykstyrken

$$\sigma = 39 (\dot{\epsilon})^{0,26} \left(1 - (\nu/0,320)^{1/2} \right) \text{ i MPa for } 10^{-5} \leq \dot{\epsilon} \leq 10^{-3} \quad (1.13)$$

hvor $\nu = \nu_a + \nu_b$ er summen af de relative volumener af henholdsvis luft og saltopløsning.

ν_b og dermed ν og σ afhænger af isens temperatur og saltholdighed. Frankenstein et al. (1967) angiver

$$\nu_b = \left(0,532 - \frac{49,185}{T_i} \right) S_i \text{ for } -22,9^\circ\text{C} < T_i < -0,5^\circ\text{C} \quad (1.14)$$

T_i indsættes i $^\circ\text{C}$ (negative værdier) og S_i i ‰ .

Eksempel:

For typisk Kattégatis hvor $S_i = 2\text{‰}$ og $T_i = -2^\circ\text{C}$ fås af (1.14) og (1.13) for $\nu_a = 2\text{‰}$ og $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ sek}^{-1}$

$$\nu_b = \left(0,532 - \frac{49,185}{-2} \right) \cdot 0,002 = 0,050$$

$$\nu = 0,02 + 0,050 = 0,070$$

$$\sigma = 39 (10^{-4})^{0,26} \left(1 - (0,070/0,320)^{1/2}\right) = 1,89 \text{ MPa}$$

$$\text{Såfremt } T_i = -10^\circ\text{C} \text{ findes } \sigma = 2,48 \text{ MPa}$$

Weeks and Assur (1969) angiver følgende formel for trykstyrken

$$\sigma_u = \sigma_o \left(1 - \left(\frac{\nu_b}{\nu_o}\right)^{1/2}\right) \quad (1.15)$$

hvor σ_o er en referencestyrke, som er uafhængig af isens saltholdighed og temperatur. ν_o , der er en referenceværdi for ν_b , kan som første estimat sættes til 0,275. σ_o bestemmes for den aktuelle lokalitet ud fra målinger af isens trykstyrke, temperatur og saltholdighed, idet ν_b bestemmes af f.eks. (1.14). Formel (1.15) er gældende for området, hvor tøjningshastighed har moderat indflydelse på styrken.

Tabel 1.3 angiver værdier af σ_o for skandinaviske farvande.

Tabel 1.3. Referencetrykstyrke σ_o for is i Skandinavien (Christensen 1990).

lokalitet	middel	standardafvigelse	min.	max
Indre danske farvande	2,44 MPa	0,86 MPa	1,31 MPa	5,27 MPa
Botniske bugt	2,76 MPa	1,07 MPa	1,49 MPa	6,51 MPa

Eksempel:

For typisk Kattegatis hvor middelreferencestyrken iflg. Tabel 1.3 er $\sigma_o = 2,4 \text{ MPa}$, $T_i = -2^\circ\text{C}$ og $\nu_b = 0,050$, fås af (1.15) med $\nu_o = 0,275$

$$\sigma_u = 2,1 \text{ MPa}$$

Den Danske Norm (DS 410) angiver:

istype	karakteristisk trykstyrke, r_c
ferskvandsis	2,5 MPa
havvandsis	1,6 MPa *)

*) ændret fra 1,2 MPa år 1990.

1.9 Isens bøjningsstyrke

Isens trækstyrke er typisk 3-4 gange mindre end trykstyrken, jf. Fig. 1.3. Heraf følger, at bøjningsstyrken er væsentlig mindre end trykstyrken. Bøjningsstyrken σ_f defineres traditionelt ud fra målt brudmoment i en bøjningspåvirket bjælke med rektangulært tværsnit, idet der forudsættes lineær spændingsvariation. Da spændingsvariationen langt fra er lineær, må σ_f opfattes som et fiktivt mål for bøjningsstyrken af isen.

Weeks og Assur (1967) angiver følgende udtryk for bøjningsstyrken, σ_f (flexural strength):

$$\sigma_f = 0,75 \left(1 - (\nu_b/0,202)^{1/2}\right) \text{ MPa} \quad (1.16)$$

ν_b bestemmes af (1.14).

Dataintervallerne for de parameterværdier formelen er baseret på er $5^{\circ}/_{00} < S_i < 19^{\circ}/_{00}$ og $-12^{\circ}\text{C} < T_i < -1,7^{\circ}\text{C}$, ifølge Christensen (1990).

Eksempel:

For typisk Kattegatis hvor $S_i = 2^{\circ}/_{00}$ og $T_i = -2^{\circ}\text{C}$ findes af (1.16) og (1.14)

$$\nu_b = 0,050 \quad \text{og} \quad \sigma_f = 0,38 \text{ MPa}$$

Regnes $T_i = -10^{\circ}\text{C}$ findes

$$\nu_b = 0,011 \quad \text{og} \quad \sigma_f = 0,47 \text{ MPa}$$

Den Danske Norm (DS 410) angiver:

istype	karakteristisk bøjningsstyrke, r_b
ferskvandsis	1,2 MPa
havvandsis	0,5 MPa

Isstyrker som tryk- og bøjningsstyrker er at betragte som stokastiske variable. Styrkerne er tilnærmet normalfordelte med variationskoefficienter af størrelsesordenen 25%.

1.10 Isens Adhæsionsstyrke

Is i ro fastfryser til konstruktioner, uanset materialets beskaffenhed. Påvirkes isen herefter til bevægelse, f.eks. som følge af vandstandsvariationer, overfører isen kræfter til konstruktionen. Overstiger de herved skabte spændinger isens adhæsionsstyrke, løsner isen sig fra konstruktionen. Adhæsionsstyrken er stærkt afhængig af materialet og af isens temperatur og saltholdighed.

Adhæsionsstyrken varierer typisk i intervallet $\sigma_a = 140 - 1050$ kPa for ferskvand-sis (Michel 1970), hvor lave værdier svarer til glatte plastikoverflader. Carstens (1980) målte en maximalværdi på $\sigma_a = 1950$ kPa for is med saltindhold 0.4‰ ved -23°C .

Når adhæsionsstyrken overstiger isens brudstyrke, sker et brud i selve isen og ikke i skillefladen imellem is og konstruktion.

1.11 Friktionskoefficient

Friktionskoefficienten for kraftoverførsel fra is til konstruktion varierer typisk i intervallet $\mu = 0,1 - 0,5$, hvor små værdier svarer til våd is med temperatur nær 0°C , og store værdier svarer til tør kold is. Typiske værdier for is mod beton er $\nu = 0,1 - 0,2$.

1.12 Termisk volumenændring af is

Sammenhænge imellem volumen- og temperaturændring er givet ved

$$\frac{d_{vol}}{Vol} = \alpha_v dT_i \quad (1.17)$$

Ekspansionskoefficienten for is afhænger stærkt af istemperatur og -saltholdighed, jf. Tabel 1.4 der angiver den volumetriske ekspansionskoefficient, α_v .

Tabel 1.4. Volumetrisk ekspansionskoefficient α_v ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) for is.

Istemp. T_i $^{\circ}\text{C}$	Salinitet S_i ‰					
	0	2	4	6	8	10
-2	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$-22,10 \cdot 10^{-4}$	$-45,89 \cdot 10^{-4}$	$-69,67 \cdot 10^{-4}$	$-93,46 \cdot 10^{-4}$	$-117,25 \cdot 10^{-4}$
-4	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$-4,12 \cdot 10^{-4}$	$-9,92 \cdot 10^{-4}$	$-15,73 \cdot 10^{-4}$	$-21,53 \cdot 10^{-4}$	$-27,34 \cdot 10^{-4}$
-6	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$-1,06 \cdot 10^{-4}$	$-3,81 \cdot 10^{-4}$	$-6,55 \cdot 10^{-4}$	$-9,30 \cdot 10^{-4}$	$-12,05 \cdot 10^{-4}$
-8	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-4}$	$-1,37 \cdot 10^{-4}$	$-2,90 \cdot 10^{-4}$	$-4,43 \cdot 10^{-4}$	$-5,95 \cdot 10^{-4}$
-10	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$0,83 \cdot 10^{-4}$	$-0,02 \cdot 10^{-4}$	$-0,88 \cdot 10^{-4}$	$-1,73 \cdot 10^{-4}$	$-2,59 \cdot 10^{-4}$
-12	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$0,57 \cdot 10^{-4}$	$0,00 \cdot 10^{-4}$	$-0,57 \cdot 10^{-4}$	$-1,13 \cdot 10^{-4}$
-14	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,33 \cdot 10^{-4}$	$-0,13 \cdot 10^{-4}$	$-0,59 \cdot 10^{-4}$
-16	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$0,85 \cdot 10^{-4}$	$0,43 \cdot 10^{-4}$	$0,02 \cdot 10^{-4}$	$-0,40 \cdot 10^{-4}$
-18	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$0,96 \cdot 10^{-4}$	$0,60 \cdot 10^{-4}$	$0,23 \cdot 10^{-4}$	$-0,13 \cdot 10^{-4}$
-20	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$0,76 \cdot 10^{-4}$	$0,45 \cdot 10^{-4}$	$0,14 \cdot 10^{-4}$
-22	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$0,93 \cdot 10^{-4}$	$0,70 \cdot 10^{-4}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$

Positive værdier af α_v svarer til ekspansion ved stigende temperatur. At koefficienterne er både positive og negative har ikke stor praktisk betydning, idet man normalt kan forvente både stigning og fald i temperatur. Bemærk, at α_v for ferskvandsis er konstant.

Koefficienten for 1-dimensional (lineær) ekspansion α_ℓ beregnes af

$$\alpha_\ell = (1 + \alpha_v)^{1/3} - 1 \simeq \alpha_v/3 \text{ for små } \alpha_v \quad (1.18)$$

Såfremt isen frit kan ekspandere og trække sig sammen, gælder for små temperaturændringer dT_i , hvor α_ℓ kan regnes konstant,

$$d\varepsilon = \alpha_\ell dT_i \quad \text{og} \quad \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \alpha_\ell \frac{dT_i}{dt} \quad (1.19)$$

Kræfter forårsaget af termisk ekspansion eller kontraktion er meget vanskelige at beregne på grund af isens komplicerede mekaniske egenskaber, herunder især krybningsegenskaberne. En typisk sammenhæng imellem $\dot{\varepsilon}$ og isens trykstyrke er givet i Fig. 1.15 og 1.16.

Kapitel 2

Islasttyper og lastfrembringende kræfter

2.1 Oversigt over isens hovedformer, ydre lastfrembringende påvirkninger, islasttyper og islastbegrænsninger

Ud over isens materialeegenskaber afhænger islasten af islegemets hovedform (geometri), af de ydre kræfter på isen samt af konstruktionens geometri og deformationsegenskaber.

Is optræder i følgende *hovedformer*, som er bestemmende for islasten

- Sammenhængende isdække (overfladeis)
- Isflager (brudstykker af isdække)
- Isskruninger (ophobning af sammenpressede isflagestykker)
- Isbjerge dannet ved afbræk af gletschere
- Isskasser (små isbjerge eller brudstykker af større isbjerge)
- Isfod (isbræmme fastfrosset til konstruktion og kystformation i vandspejls variationsområdet)

De *ydre lastfrembringende påvirkninger* på isen er

- Vind
- Strøm
- Bølger
- Opdriftændringer
- Temperaturændringer

Islaster på konstruktioner kan inddeles i tre *lasthovedtyper*:

- Horisontale laster frembragt ved statisk tryk fra stilleliggende is påvirket af vind, strøm og bølger eller ved dynamisk påvirkning fra is i bevægelse som følge af strøm, is og bølger.
- Vertikale (eller skrå) laster frembragt af vandstandsvariation som medfører ændring af opdrift på is fastfrosset til konstruktionen, eller frembragt af isflager og isskruninger, som grundet strøm, vind og bølger presses op ad en skrå konstruktion.
- Termisk ekspansion (og kontraktion) af is. Konstruktionskræfter er i reglen små og uden betydning, idet der let opstår revner i isen.

Islasten på konstruktionen afhænger i høj grad af *konstruktionens hovedgeometri og deformationsegenskaber*. Det er hensigtsmæssigt at skelne imellem følgende konstruktionskarakteristika:

- Vertikal versus skrånende front
- Smal versus bred konstruktion (målt vinkelret på islastretningen i islastzonen)
- Stiv versus eftergivelig konstruktion

Islastens størrelse begrænses af

- De ydre kræfter på isen.
- Isens brudlast.
- Isens kinetiske energi (som omsættes til arbejde og dissiperes ved stød mod konstruktionen).
- Friktions- og adhæsiionskræfter imellem is og konstruktion.

2.2 Islastens karakter og afhængighed af konstruktionens geometri og stivhed

Hvor isen brydes mod en konstruktion, er brudmåden (brudmønsteret, brudfiguren) bestemmende for lastens størrelse, jf. geotekniske beregninger for bæreevne af fundamenter. Brudmåden afhænger af isens styrke og deformationsegenskaber, af isens geometri og randvilkår samt af konstruktionens geometri og overfladeruhed. Isens styrke og deformationsegenskaber er som tidligere nævnt stærkt afhængige af tøjningshastigheden. Heraf følger, at isens bevægelseshastighed i forhold til konstruktionen er af betydning for lasten.

De vigtigste brudformer for is er

- knusning (overskridelse af tryk/forskydningsstyrke)
- bøjningsbrud (overskridelse af bøjningsstyrke)
- kløvning (overskridelse af trækstyrke)

Knusning optræder typisk, hvor isbjerge støder mod konstruktioner, samt hvor isflader støder eller presses mod konstruktioner med lodret front, jf. Fig. 2.2 d og f.

Bøjningsbrud optræder oftest, hvor isflager presses mod en konstruktion med skrå front, jf. Fig. 2.2 g. Bøjningsbruddet giver relativt små laster, hvorfor det ofte er en fordel at udføre konstruktioner mod skrå front. Jo mere skrå og jo mere fast fronten er, desto lettere fremkaldes bøjningsbruddet. En glat skrå front har desuden den fordel, at islasten rettes ned mod fundamentsfladen, idet iskraften vil være næsten vinkelret på konstruktionsoverfladen. *Kløvning* kan optræde hvor isflager presses mod en smal konstruktion, jf. Fig. 2.2.e.

Konstruktionens bredde vinkelret på islastretningen har stor betydning for islasten. Ved smalle konstruktioner, som f.eks. bropiller, kan isdække og isflager føres forbi konstruktionen, idet konstruktionen "presses ind" i isen. Ved brede konstruktioner, som f.eks. kunstige øer for kulbrinteudvinding i arktiske områder, vil isen efter brud ophobes som isskrudninger langs konstruktionens front.

Islasten kan være af *statisk* eller *dynamisk* karakter. Statisk eller kvasistatisk islast, hvor lasten varierer langsomt med tiden, optræder, hvor stilleliggende is presses mod en stiv konstruktion, uden at der sker brud i isen. Dynamisk last, dvs. last der varierer væsentligt inden for tidsrum af størrelsesordenen sekunder eller mindre, optræder dels når is i bevægelse støder mod en konstruktion, dels når is bryder mod konstruktionen således, at isen presses helt eller delvis forbi konstruktionen. I sidstnævnte tilfælde bryder isen i ryk svarende til takten i

dannelsen af brudflader. Sidstnævnte tilfælde er illustreret i Fig. 2.1, der viser en lasttidsserie for en isflage, der presses forbi en stor, stiv konstruktion.

Ved *slappe konstruktioner*, som for eksempel slanke stålørstøjtårne på dybere vand, er det uheldigt såfremt konstruktionens egensvingningstid er sammenfaldende eller tæt på de fremherskende perioder i lastsignalet, idet der kan opstå dynamisk forstærkning af lasten. Størrelsen af denne forstærkning afhænger af dæmpningen, hvilken igen afhænger af konstruktionsudformning samt funderingsforholdene.



Figur 2.1. Illustration af lasthistorie ved isknusning mod en stor, stiv konstruktion.

Men selv *stive konstruktioner*, som for eksempel jordfyldte jernbetonsænkekasser anvendt til bro piller, pierkonstruktioner og fyrtårnsfundering, har ofte en egensvingningstid i intervallet 1-2 sek., dvs. i et sædvanligt område for lastvariationen ved isknusning.

Et groft skøn over lastfrekvensen f_c ved en isflage, der ved *knusning* føres forbi en konstruktion, kan findes af udtrykket (Määttänen, 1975)

$$f_c = \xi V / F_{i,f} \quad , \quad (2.1)$$

hvor V er isflagens hastighed, ξ er systemets (konstruktion incl. fundering) fjederkonstant og $F_{i,f}$ er isbrudlasten (max. $F_{i,f}$).

Lastfrekvensen ved foldningsbrud vil være forskellig fra frekvensen givet ved (2.1), jf. fig. 2.1.

Det følger af ovenstående fremstilling, at det ved udvikling af formler for islasts er hensigtsmæssigt at skelne imellem følgende konstruktionskarakteristika:

- *vertikal* versus *skrånende* front
- *smal* versus *bred* konstruktion, målt vinkelret på lastretningen
- *stiv* versus *eftergivelig* konstruktion.

2.3 Islastens begrænsninger

Den maksimale islast på en konstruktion er begrænset af enten

- den resulterende ydre kraft der virker på isen, dvs. kraften fra strøm, vind og bølger samt termisk kraft
- isens brudlast, $F_{i,f}$, dvs. den last som netop fremkalder brud i isen
- den kinetiske energi som is i bevægelse omsætter til arbejde (dissiperes) ved stød mod konstruktionen
- friktions- og adhæsionskræfter imellem is og konstruktion.

Vedrørende omsætning af kinetisk energi kan i det simpleste tilfælde betragtes en isflage eller et isbjerg, som idet de rammer centralt og hastigheden dermed reduceres fra V til nul, vil bevirke en total omsætning af hele den kinetiske energi til arbejde ved knusning af is i stødfladen, dvs.

$$\frac{1}{2}MV^2(1 + C_m) = \int_0^X F_i(x) dx \quad (2.2)$$

hvor M er isens masse, C_m er tillægsmassekoefficienten (added mass coefficient) og F_i er den resulterende islast i stødfladen som afhænger af konstruktionens indtrængning X i isen. Der er her forudsat, at det arbejde, som strøm og vindkræfter udfører på isen under stødet, kan negligeres. Er dette ikke acceptabelt, må bidraget medtages på venstre side i formlen (2.2). Vedr. beregning af stødlaster kan i øvrigt henvises til principperne for beregning af skibsstød mod konstruktioner (incl. fenderværker).

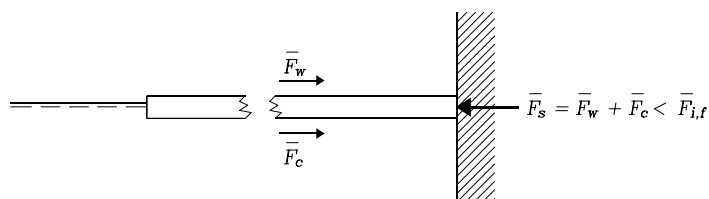
Såfremt den afleverede kinetiske energi er tilstrækkelig til at udbrede stødfladen til konstruktionens fulde bredde (vinkelret på kraftretningen) begrænses islasten F_i af isens brudlast $F_{i,f}$. Såfremt isen bringes til standsning ved stødet, begrænses F_i desuden af den på isen resulterende ydre kraft.

Ved beregning af laster fra isbjerge skal man være opmærksom på at isen, der er dannet af sne, er forsk og ofte meget stærkere end havis.

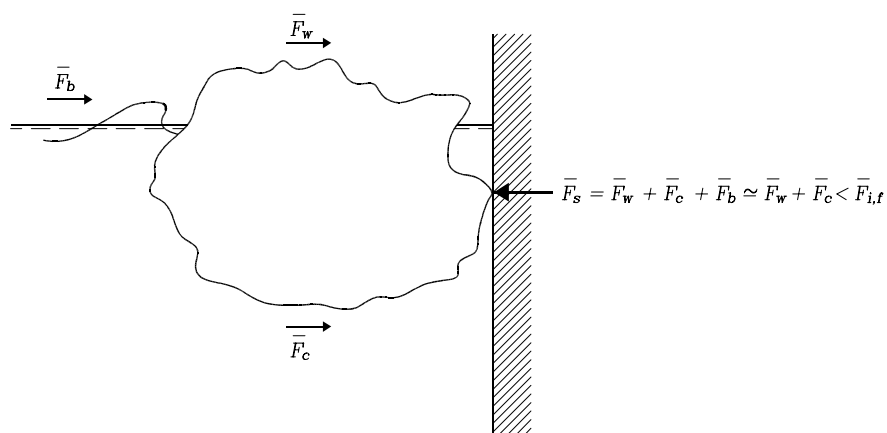
2.4 Oversigt over typiske lasttilfælde

Betegnelser:

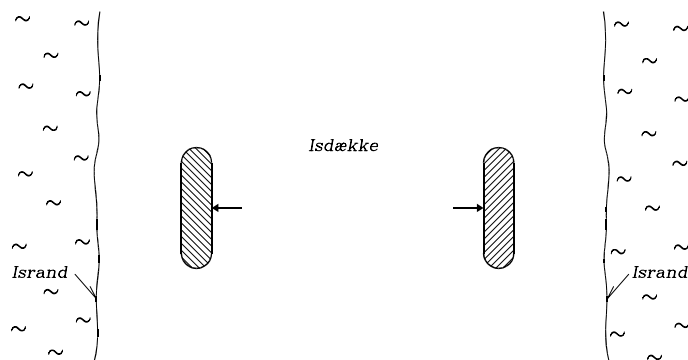
\bar{F}_w	resulterende	vindlast på is
\bar{F}_c	—	strømlast på is
\bar{F}_b	—	bølgelast på is
$\bar{F}_{i,f}$	—	brudlast for isen
\bar{F}_s	—	islast på konstruktion
V_i	ishastighed	



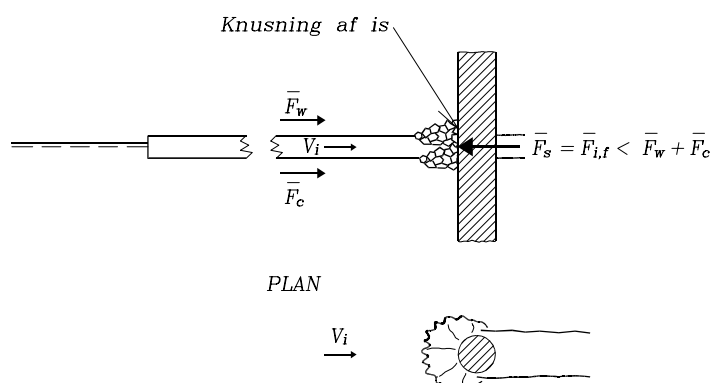
Figur 2.2.a. Kvasistatisk horisontal last fra isflage.



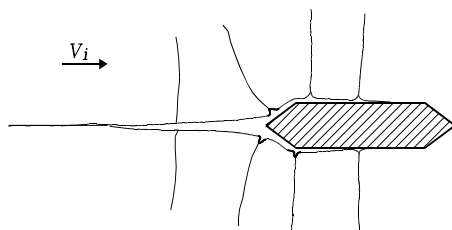
Figur 2.2.b. Kvasistatisk horisontal last fra isbjerg eller isophobning.



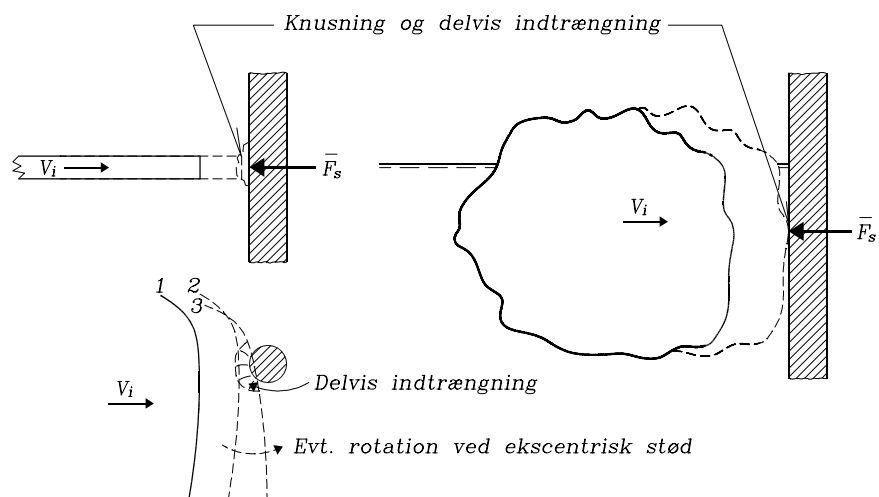
Figur 2.2.c. Kvasistatisk horisontallast på stiv konstruktion ved termisk ekspansion.



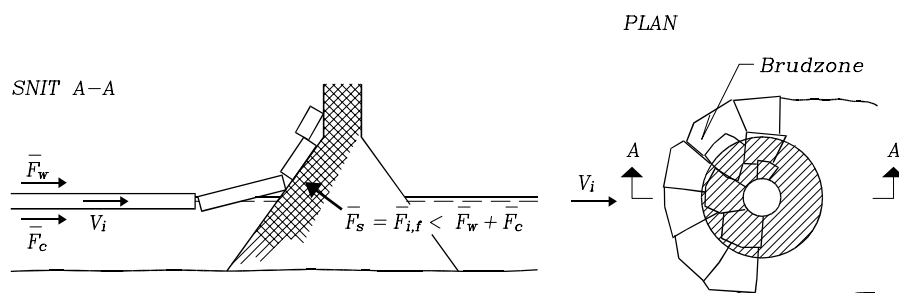
Figur 2.2.d. Dynamisk horisontal last fra isflage som presses forbi konstruktion.



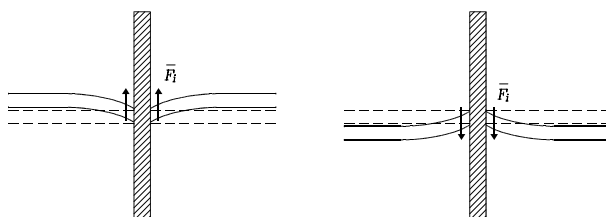
Figur 2.2 e. Kløvning af isflage som presses forbi konstruktion.



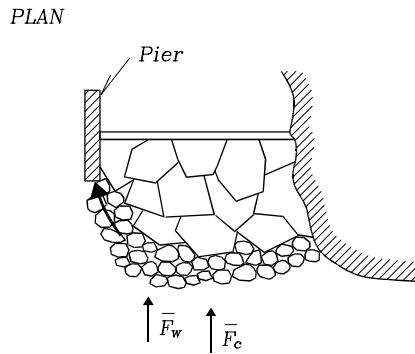
Figur 2.2.f. Dynamisk horisontal støddlast fra drivende isflage eller isbjerg.



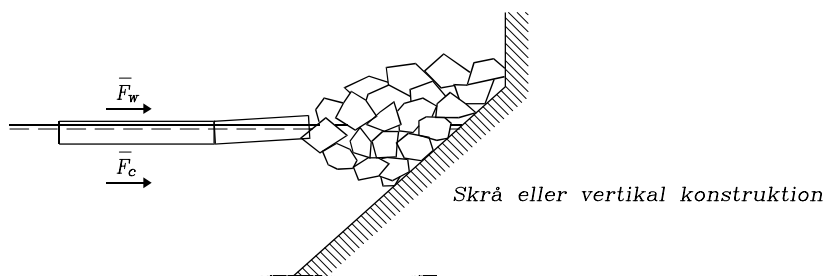
Figur 2.2.g. Dynamisk ikke-horisontal last fra isflage som presses forbi skrå konstruktion.



Figur 2.2.h. Vertikale kræfter fra isdække ved vandstandsvariation.



Figur 2.2.i. Forøget islast ved buevirkning i sammenpakket is.



Figur 2.2.j. Forøget islast ved strandet isophobning (isskruning), som forøger den effektive konstruktionsbredde vinkelret på lastretning.

2.5 Strøm- og vindkræfter på is

Kraftpåvirkningen fra *vind* og *strøm* kan opdeles i en overflademodstand og en formmodstand. *Overflademodstanden* beregnes som integralet af produktet af forskydningsspændingen $\bar{\tau}$ og det overfladeareal hvorover τ virker.

Formmodstanden, der skyldes relativt overtryk på opstrømsside og relativt undertryk på læsiden, beregnes som integralet af prikproduktet af trykket på p og overfladearealet.

Ved isflager dominerer overflademodstanden, medens formmodstanden dominerer ved isbjerger.

Tilsammen udgør de to modstande strømningsmodstanden F_D (drag force), der traditionelt beregnes som

$$\bar{F}_D = C_D \frac{1}{2} \rho \bar{V} |V| A_{\perp V}, \quad (2.3)$$

hvor dragkoefficienten C_D afhænger af legemets form og ruhed samt af Reynolds' tal. Endvidere afhænger C_D af den valgte referenceværdi V for luftens/vandets hastighed forbi legemet. For vand anvendes normalt strømhastigheden uden for grænselaget mod isen. For vind anvendes ofte vindhastigheden i 10 meters højde, dvs. en værdi i grænselaget. ρ er massetætheden af luft/vand. $A_{\perp V}$ er arealet af legemets projektion på en plan vinkelret på \bar{V} .

Formlen (2.3) er hensigtsmæssig ved beregning af strømningsmodstanden for buttede legemer af begrænset udstrækning, såsom mindre og mellemstore isbjerge, hvor formmodstanden dominerer. Ved udstrakt isdække og større isflager duer formelen imidlertid ikke, idet $A_{\perp V}$ er forsvindende i forhold til det areal, forskydningsspændingen virker på. Der anvendes derfor udtrykket

$$\bar{F}_\tau = \tau A_\tau = f \frac{1}{2} \rho \bar{V} |V| A_\tau \quad (2.4)$$

hvor f er friktionstallet, der afhænger af overfladens ruhed samt Reynolds' tal. Endvidere afhænger f af den valgte referenceværdi V af luftens/vandets hastighed forbi isflaget. A_τ er det areal, hvorover forskydningsspændingen τ virker, dvs. arealet af isdække/flaget. Ved meget store isbjerge må der regnes med både overflademodstand og formmodstand, idet disse isbjerge ofte har karakter af flydende øer med store arealer på over- og underside.

Strømkraft på isflager og isdække

Formel (2.4) gælder med fast værdi af f kun over strækninger med uforandret hastighedsprofil, dvs. ved ensformig strømning. Fig. 2.3 viser den uensformige strømning, som opstår under isen ved isranden, og som bevirker, at τ (og f) varierer fra en maksimalværdi ved randen henimod en næsten konstant (svagt aftagende værdi).

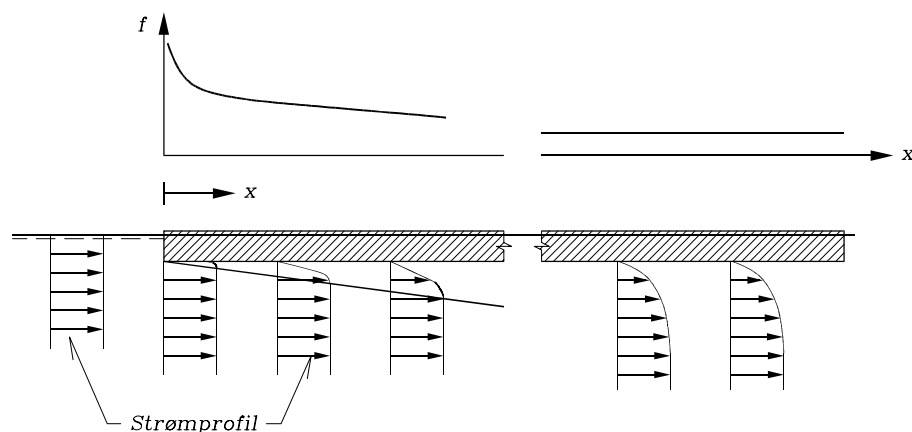


Fig. 2.3. Illustration af hastighedsprofiler for strømning nær isranden.

Idet der forudsættes turbulent strømning kan f estimeres ud fra udtrykket

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,5 + 4,14 \log \left(\frac{x}{k} \sqrt{f} \right) \quad (2.5)$$

som dog kun gælder når x (se Fig. 2.3) er stor i forhold til overfladeruheden k . Typiske værdier af f er angivet i Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Friktionsfaktor f som funktion af ruhed k i afstand x fra opstrøms isrand.

k m	x m				
	10	100	500	1000	5000
0,005	0,0055	0,0034	0,0025	0,0023	0,0018
0,01	0,0065	0,0039	0,0029	0,0025	0,0020
0,05	0,0101	0,0055	0,0039	0,0034	0,0025
0,10	0,0128	0,0065	0,0045	0,0039	0,0029

Ved grovere beregninger negligeres den randbestemte variation af f og der regnes for typisk havis med søjlestruktur med en gennemsnitsværdi på 0,004. Den tilsvarende referencehastighed er middelvandhastigheden målt 1 m under isens underside.

Eksempel:

Strømhastighed 1 m under isens underside 0,8 m/s.

Ishastighed 0,1 m/s. $V = 0,8 - 0,1 = 0,7$ m/s.

$\rho_w = 1020$ kg/m³, $f = 0,004$.

Af (1.19) fås

$$\tau = 0,004 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1020 \cdot 0,7^2 = 1,00 \text{ N/m}^2$$

Strømkraften på en 1 km² stor isflage er

$$F_\tau = 10^6 \cdot 1,00 = 1,00 \text{ MN}$$

Vindkraft på isflager og isdække

Den på Fig. 2.3 illustrerede randeffekt er langt mindre udpræget ved vindprofilet, idet der allerede over åbent vand eksisterer et grænselag. Endvidere er isoverkantens højde over vandspejlet meget lille og forskellen i ruhed imellem en havoverflade med bølger og en typisk havis er lille. Randeffekten kan derfor negligeres. Beregning af vindforskydningsspændingen baseres ofte på $f = 0,004$ (dvs. som ved strøm), som er en konservativ gennemsnitsværdi, idet f for isdække med stor udstrækning er fundet varierende i intervallet 0,002 - 0,005 afhængigt af ruheden, se f.eks. angivelserne i Danys, 1977. Den tilhørende referencevindhastighed er middelvindhastigheden i 10 meters højde over isens overside. Luftens massetæthed ρ_a er 1,3 kg/m³ ved 0°C.

Eksempel:

Vindhastighed i 10 m højde $V = 25$ m/s

$\rho_a = 1,3$ kg/m³. $f = 0,004$.

Af (1.19) fås

$$\tau = 0,004 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,3 \cdot 25^2 = 1,63 \text{ N/m}^2$$

Vindforskydningsspændingen på en 1 km² stor isflage er

$$F_\tau = 10^6 \cdot 1,63 = 1,63 \text{ MN}$$

Strøm- og vindkraft på isbjerge

C_D -værdier kan for eksempel estimeres ud fra værdier gældende for skibe.

2.6 Kræfter fra termisk volumenændring af is

Kræfter forårsaget af termisk ekspansion eller kontraktion er som nævnt i kapitel 1.12 meget vanskelige at beregne på grund af isens komplicerede elastisk-plastiske egenskaber. Termiske kræfter har især relevans i forbindelse med følgende situationer:

- Isdækket er fasstholdt langs den ene rand, f.eks. ved en kyst, samtidig med, at der i lang afstand herfra befinder sig en konstruktion enten i isen eller ved den frie isrand. Termisk ekspansion kan medføre, at isen bevæges forbi konstruktionen, eksempelvis med brudmønstre til følge som angivet i figurerne 2.2.d, e og g.

Ud fra formel (1.19) beregnes isfastholdelsen ν i afstanden ℓ fra den faste begrænsning til

$$V = \frac{d\varepsilon}{dt}\ell = \dot{\varepsilon}\ell = \alpha_\ell \frac{dT_i}{dt}\ell \quad (2.6)$$

- Isdækket er indesluttet imellem to forholdsvis tæt beliggende langstrakte ueftergivelige bropper, jf. fig. 2.2.c

På grund af pillernes modhold genererer en termisk ekspansion spændinger i isen, som fremkalder tøjningshastigheder svarende til ekspansionshastigheden. Der opstår således ingen nettobevægelse af isen imellem de to piller.

På grund af isens plastiske egenskaber, jf. figurerne 1.15 og 1.16 afhænger termisk islast i høj grad af isens temperaturændringshastighed, givet ved dT_i/dt i (1.19).

Den termiske udvidelse af et isdække sker i hovedsagen i følgende to situationer:

- Hurtig stigning eller fald i lufttemperaturen over et snefrit isdække
- Snefald på et meget koldt men snefrit isdække, hvilket pga. sneens isolerende virkning bevirker, at isens gennemsnitstemperatur nærmer sig vandets.

De i naturen sædvanligt forekommende maximale værdier af $|dT_i/dt|$ vil være i intervallet $1-10^\circ\text{C/time}$. Regnes eksempelvis med $\alpha_\ell = -10^{-4}$ og $\alpha_\ell = 5 \cdot 10^{-5}$ findes af (1.18) de tilsvarende tøjningshastigheder at være af størrelsesordenen $|\dot{\varepsilon}| = 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-7} \text{s}^{-1}$. Det ses af figurerne 1.15 og 1.16 samt af (1.13), at isens trykstyrke kun er af størrelsesordenen 0,2-0,4 MPa ved disse små tøjningshastigheder.

I DS 409 angives følgende vedrørende termisk bestemte islaster fra isdække:

“Den vandrette islast q_t hidrørende fra termiske bevægelser i isdækket, som påvirker en bropille i broens længderetning, regnes ensidig og ensformig fordelt langs bropillens langside. Den bestemmes af

$$q_t = 0,04 r_c \cdot e \quad \psi = 0 \text{ (lastreduktionsfaktor)} \quad (2.7)$$

Den karakteristiske trykstyrke r_c er anført i afsnit 1.8. e , der er den karakteristiske middelistykkelse for danske farvande, sættes til 0,6 m, jf. i øvrigt formel (1.6).

Eksempel:

En konstruktion er indefrosset i et isdække i afstanden $\ell = 1000$ m fra kystlinien, hvor isen er fastfrosset.

$S_i = 2^{\circ}/_{00}$, luftvolumen $\nu_a = 2\%$,
isens begyndelsestemperatur $T_i = -4^{\circ}\text{C}$,
 $\frac{dT_i}{dt} = -2^{\circ}\text{C} / \text{time} \simeq -6 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C/s}$.

Af Tabel 1.4 og 1.18 findes

$$\begin{aligned} \alpha_v &= -4,12 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ og dermed} \\ \alpha_\ell &\simeq -1,4 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

Isens hastighed i afstanden $\ell = 1000$ m, hvor konstruktionen befinder sig, findes af (2.6)

$$V = -1,4 \cdot 10^{-4} (-6 \cdot 10^{-4}) \cdot 1000 \simeq 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \simeq 0,30 \text{ m/time}$$

Såfremt konstruktionen har en meget stor udstrækning parallelt med kystlinien, vil den termiske udvidelse bevirke konstant spændingstilstand overalt i isdækket, hvorfor $\dot{\varepsilon}$ kan bestemmes af (1.19) eller (2.6) til $\dot{\varepsilon} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$. Den tilsvarende istrykstyrke beregnes ifølge (1.13) til $\sigma = 0,3 \text{ MPa}$.

Er konstruktionens bredde b vinkelret på isbevægelsesretningen lille i forhold til ℓ genereres kun væsentlige spændinger lokalt foran konstruktionen. Regnes som en grov tilnærmelse med konstant spænding (og tøjning) indtil afstanden b fra konstruktionen og nul spænding uden for, dvs. over afstanden $\ell - b \simeq \ell$, findes hvis $b = 20$ m

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \frac{\ell}{b} = \frac{V}{b} = \frac{7 \cdot 10^{-5}}{20} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Den tilsvarende istrykstyrke findes af (1.13) til $\sigma = 0,8 \text{ MPa}$.

Er istykkelsen $h = 0,6 \text{ m}$, svarer dette til en samlet horisontal last på konstruktionen på maksimalt $\sigma \cdot b \cdot h = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 0,6 = 9,6 \cdot 10^6 \text{ N}$. Hvorvidt denne maximallast optræder vil afhænge af, om der for en mindre last kan dannes brud i isen, jf. kapitel 3.

Angivelsen (2.7) i DS 409 indebærer, at der på bropiller skal regnes med en karakteristisk istrykstyrke på $0,04 r_c$, hvilket for havvandsis er, jf. Tabel 1.3, $\sigma = 0,04 \cdot 1,6 \text{ MPa} = 0,064 \text{ MPa}$. Forudsættes konstant spændingstilstand i isdækket og regnes eksempelvis med iskarakteristika som i ovenstående eksempel findes, at denne lave trykstyrke svarer til $\dot{\epsilon} = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ og en temperaturændringshastighed på kun $7 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/time}$!

Kapitel 3

Isbrudlast mod stive konstruktioner

3.1 Isbrudlast fra isflager og isdække på konstruktioner med lodret front

Med lodret front forstås vinkler med lodret, der er så små ($\simeq 15^\circ$, at der optræder knusning eller kløvning af isen, – og ikke bøjningsbrud, som fremtvinges, når isen løftes af en skrå konstruktion.

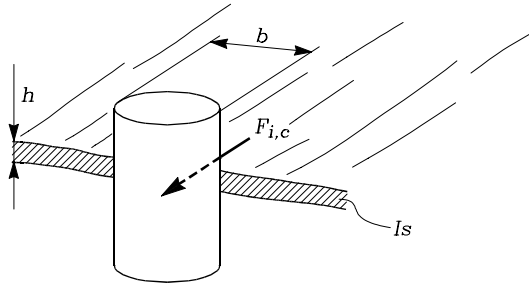
3.1.1 Smalle konstruktioner

For *smalle konstruktioner*, hvorved forstås pæle, fyrtårne, bro piller, caissoner i pierkonstruktioner etc., er den fremherskende brudform *knusning*.

De fleste eksisterende formler for isbrudlast ved knusning, $F_{i,c}$, er opbygget som

$$F_{i,c} = p_e b h = K \sigma b h \quad (3.1)$$

hvor b er konstruktionsbredden og h er isens tykkelse, jf. Fig. 3.1. p_e er derfor at opfatte som et gennemsnitligt istryk defineret som $F_{i,c}$ divideret med kontaktalets projektion vinkelret på $F_{i,c}$. p_e formuleres i reglen som produktet af isens trykbrudspænding σ og en koefficient K , der afhænger af de geometriske forhold.



Figur 3.1. Definition af istykkelse og konstruktionsbredde.

I det følgende anføres en række formler fra litteraturen og fra normer.

Korzhavin (1962)

$$F_{i,c} = I m k (V/V_o)^{-1/3} \sigma b h \quad (3.2)$$

Empirisk formel hvor trykbrudspændingen σ skal svare til tøjningshastighedsintervallet $10^{-3} - 10^{-2}$ sek. $^{-1}$. V er isflagens hastighed, V_o er en referencehastighed = 1 m/sek., I er en koefficient, der afhænger af flagebredden B i forhold til konstruktionsbredden b , koefficienten m tager hensyn til faconen af konstruktionens front, koefficienten k tager hensyn til ikke-samtidigheden i lasten langs konstruktionen. Koefficienterne angives som følger:

$$I = (B/b)^{1/3} \quad \text{for } B/b < 15$$

$$I = 2,5 \quad \text{for } B/b \geq 15$$

$$m = 1 \quad \text{for flad front (rektangulære tværsnit)}$$

$$m = 0,9 \quad \text{for halvcirkelformet front}$$

$$m = 0,85 \cdot (\sin \beta)^{1/2} \quad \text{for kileformet front med kilevinkel } 2\beta \text{ imellem } 60^\circ \text{ og } 120^\circ$$

$$0,4 \leq k \leq 0,7 \quad \text{lave værdier svarer til store ishastigheder, og omvendt.}$$

Afanas'yev, Dologopolov and Shvayshten (1971)

$$F_{i,c} = m C \sigma b h \quad (\text{gældende for } b/h < 6) \quad (3.3)$$

hvor m er en formkoefficient, 1,0 for plan front og 0,9 for halvcirkelformet front.

$$C = (5(h/b) + 1)^{0,5} \quad \text{for } 1 < b/h < 6$$

$$C = 4,17 - 1,72 b/h \quad \text{for } 0,1 < b/h < 1$$

Formlen er baseret på modellforsøg med tyndt isdække af saltvandsis.

Croasdale, Morgenstern and Nuttall (1977)

$$F_{i,c} = \left(\frac{\sqrt{2}}{4} \frac{h}{b} + 1 \right) \sigma b h \quad (3.4)$$

Formlen, der gælder for plan front, angiver en øvre grænseværdi, idet den er baseret på en teoretisk beregning, hvor der forudsættes homogent elasto-plastisk is samt Tresca's flydekriterium.

DS 410 (1982)

$$F_{i,c} = k r_c h b \quad (3.5)$$

hvor isens karakteristiske trykstyrke $r_c = 1,6$ MPa for havvandsis og 2,5 MPa for ferskvandsis

$$k = \begin{cases} 1 + \frac{3}{1+b/h} & \text{for } b/h < 9 \\ 1,75 - 0,05 b/h & \text{for } 9 < b/h < 15 \\ 1 & \text{for } b/h > 15 \end{cases}$$

For brud ved *kløvning* angives nedenstående to formler:

Schwarz, Hirayama and Wu (1974)

$$F_{i,k} = 0,564 m^{0,4} \sigma b^{0,5} h^{1,1} \quad (3.6)$$

m har enheden meter, værdier som ved formel (3.2) og (3.3). Formlen, der svarer til kløvning af isen, er delvis baseret på fuldsalamålinger på en vertikal cylinder med diameter $b = 0,6$ m samt på modellforsøg i lille skala, anbefales ikke brugt for diametre over 2 m.

Saeki, Hamanaka, Ozaki (1977)

$$F_{i,k} = A m^{0,5} \sigma b^{0,5} h \quad (3.7)$$

m har enheden meter, værdier som ved formel (3.2) og (3.3). $A = 5$ for cirkulære tværsnit og 6,8 for rektangulære tværsnit.

Formlen, der gælder for kløvning repræsenterer øvre værdier af resultater fundet ved modellforsøg og fuldsalamålinger.

Eksempel:

Beregn isbrudlasten og det tilsvarende moment i havbunds niveau for en vertikal cylinder med diameter $b = 2,0$ m placeret på 10 meters vanddybde. Der regnes med stor udbredelse af isflaget, der har tykkelsen $h = 0,60$ m og isstyrken $\sigma = 1,6$ MPa. Flagets hastighed er $V = 0,5$ m/sek.

Formel	$F_{i,c}$ (MN)	$F_{i,k}$ (MN)	Moment ved havbund (M Nm)
Korzhavin (1962) med $k = 0,6$	3,3		33
Afasnas'yev et al. (1971)	2,7		27
Croasdale et al. (1977)	2,1		21
DS 410 (1982)	3,2		32
Schwarz et al. (1974)		0,70	7,0
Saeki et al. (1977)		6,4	64

3.1.2 Brede konstruktioner

For *brede konstruktioner* kan ovenstående formler for smalle konstruktioner ikke anvendes, idet de overvurderer islasten. Årsagerne til denne tilsyneladende størrelseseffekt, som betyder mindre laster på brede konstruktioner, er ikke afklarede, men det er sandsynligt, at det bl.a. skyldes ikke-samtidighed i bruddene.

Sanderson (1986) angiver den ikke-lineære relation

$$\sigma \sim A^{-0,5} \quad (3.8)$$

imellem trykbrudstyrken σ og kontaktarealets størrelse A (m²). Tegnet \sim betyder proportional med.

Med udgangspunkt i formlerne for de smalle konstruktioner, hvor A normalt er af størrelsesordenen 1 - 10 m², kan σ -værdierne justeres således, at formlerne kan anvendes overslagsmæssigt på de brede konstruktioner.

3.1.3 Konstruktioner med flere ben

For konstruktioner med *flere ben* henvises til litteraturen, se f.eks. litteraturlisten i Christensen et al. (1989a).

3.2 Isbrudlast fra isflager og isdække på konstruktioner med skrå front

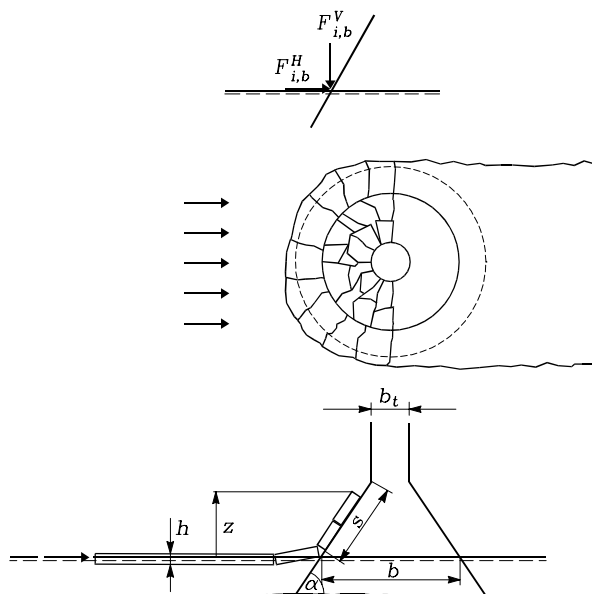
Ideen ved anvendelse af skrå front er at reducere isbrudlasten ved at fremkalde *bøjningsbrud* som den dominerende brudform. For at sikre at der sker bøjningsbrud, bør frontens hældningsvinkel α , jf. fig. 3.2, ikke være større end ca. 65°.

Hvor isdækkets bevægelsesretning er nogenlunde ens, f.eks. i floder og sunde, udføres bropillen som smalle langstrakte konstruktioner med skrå afrundet eller kileformet næse. I større vandområder, hvor isens bevægelsesretning varierer meget, anvendes konusformede konstruktioner til f.eks. fyrtårne, vindmøllefundamenter og boreplatforme.

Den skrå front bevirker, at isstykker kan presses op ad konstruktionen, hvilket giver en stabiliserende, nedadrettet kraft. På grund af en i reglen lille friktionskoefficient imellem is og konstruktion bevirker den skrå front også, at den resulterende islast bliver skråt nedadrettet, hvilket reducerer det væltende moment i fundamentsfladen.

3.2.1 Smalle koniske konstruktioner

Ved smalle koniske konstruktioner kan isen undvige sideværts, og der fremkaldes en brudform som vist på figur 3.2, når isen presses forbi konstruktionen.



Figur 3.2. Isbrudform ved konisk konstruktion.

I det følgende angives eksempler på formler for horisontal og vertikal isbrudlast på smallere koniske konstruktioner.

Croasdale (1978)

Den *horisontale* islast er ved simpel 2-dimensional teori beregnet til

$$F_{i,b}^H = 0,68C_1 \sigma_f b (\rho_w g h^5 / E)^{0,25} + C_2 \rho_i g Z b h \quad (3.9)$$

hvor σ_f er isens bøjningsstyrke (jf. kapitel 1.9), ρ_w og ρ_i er vandets og isens massetætheder, E er isens elasticitetsmodul (jf. kapitel 1.7), Z er den vertikale højde over vandspejlet af den oppressede is og C_1 og C_2 er funktioner både af konstruktionens fronthældning og af friktionskoefficienten μ (jf. kapitel 1.11)

$$C_1 = \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \quad (3.10)$$

$$C_2 = \frac{(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)^2}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} + \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\tan \alpha} \quad (3.11)$$

Første led i (3.9) repræsenterer isbrudlasten og andet led horisontalkraftbidraget fra den oppressede is.

Ralston (1977)

Ralston forudsætter, at isen opfører sig som et elastisk-plastisk materiale, der modstår elastiske deformationer op til en plasticitetsgrænse givet ved et flydemoment. De *horisontale* og *vertikale* islaster beregnes til

$$F_{i,b}^H = [A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_w g h b^2 + A_3 \rho_w g h (b^2 - b_t^2)] A_4 \quad (3.12)$$

$$F_{i,b}^V = B_1 F_{i,b}^H + B_2 \rho_w g h (b^2 - b_t^2) \quad (3.13)$$

hvor betydningen af b og b_t fremgår af fig. 3.2. σ_f er isens bøjningsstyrke og ρ_w er vandets massetæthed. Koefficienterne A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , B_1 og B_2 findes af fig. 3.3. Angående værdier af friktionskoefficienten μ henvises til kapitel 1.11.

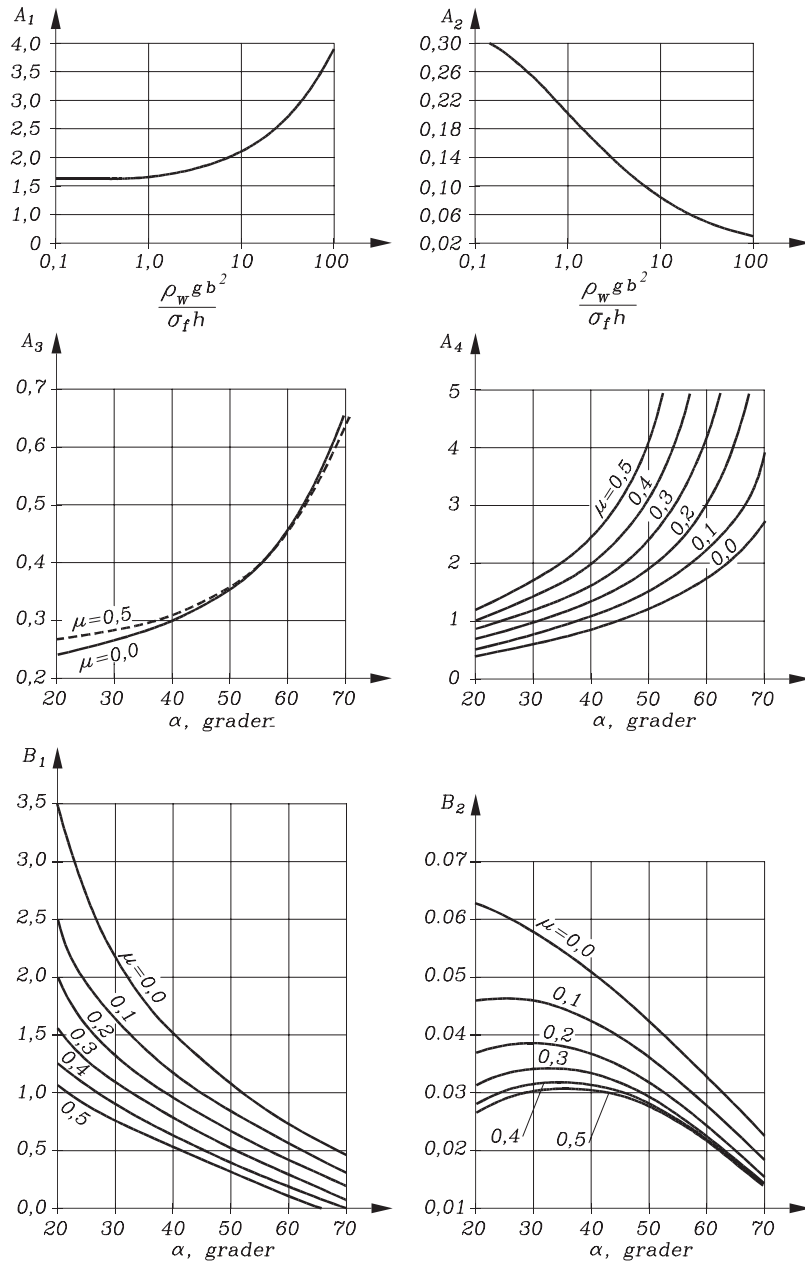
Neddykning af is giver kun en opadrettet kraft, der er $1/9$ af tyngdekraften på is, der løftes op af vandet. For konstruktioner med *negativ* skråningsvinkel (dvs. er bredest for oven), hvor isen dykkes ned i vandet, skal koefficienterne A_2 , A_3 og B_2 aflæst på figur 3.3 derfor multipliceres med faktoren $1/9$.

Såfremt konusens sidelængde S målt fra vandspejlet til konstruktionens vertikaldel, jf. fig. 3.2, er mindre end en typisk længde L af isflageafbrækket, kan der optræde horisontalkræfter på vertikaldelen, hvorved fordelingen ved den koniske facon mindskes. Hvis det antages, at længden af det største isafbræk er ca. $L/2$, hvor L er den karakteristiske længde af isen (Christensen 1989), findes følgende kriterium, der bør være opfyldt:

$$S \geq 0,5L \simeq 0,5 \left(\frac{E h^3}{12 \rho_w \cdot g (1 - \nu_P^2)} \right)^{0,25} \quad (3.14)$$

hvor E er isens elasticitetsmodul, ν_P er Poissons forhold for isen og ρ_w er vandets massetæthed.

Sættes for eksempel $E = 6 \text{ GPa}$, $h = 0,60 \text{ m}$, $\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$ og $\nu_P = 0,5$ findes $S \geq 5,5 \text{ m}$.



Figur 3.3. Koefficienter i Ralstons formel (3.13) og (3.13). α er konusens hældningsvinkel med vandret. μ er friktionskoefficienten for is mod konusoverfladen.

Edwards and Croasdale (1976)

Baseret på modellforsøg med en konusformet konstruktion med $\alpha = 45^\circ$ og $\mu =$ ca. 0,1 giver Edwards og Croasdale følgende udtryk for den horisontale islast

$$F_{i,b}^H = 1,6 \sigma_f h^2 + 6,0 \rho_w \cdot g b h^2 \quad (3.15)$$

hvor σ_f er isens bøjningsstyrke og b er konusdiameteren i vandspejlsniveau. Første led svarer til isbrudlasten og andet led til lasten fra den oppressede is. Edwards og Croasdales forsøgsresultater bekræfter Ralstons formel.

Eksempel:

Beregn horisontal og vertikal isbrudlast og det tilsvarende moment i havbundsniveau for en konisk konstruktion med skråningsvinkel $\alpha = 60^\circ$, $b = 7,8$ m, $b_t = 2,0$ m $S = 5,8$ m og vanddybde = 10 m. Isens bøjningsstyrke $\sigma_f = 0,5$ MPa, $h = 0,60$ m, $E = 6$ GPa, $\rho_i = 898$ kg/m³, $\rho_w = 1025$ kg/m³, og $\mu = 0,1$.

Formel	$F_{i,b}^H$ (MN)	$F_{i,b}^V$ (MN)	Moment om centrum af fundamentsflade (M Nm)
Croasdale (1978) med $z = 5$ m	0,079		0,79
Ralston (1977)	1,2	0,72	9,2
Edwards et al. (1976) (gælder kun for $\alpha = 45^\circ$)	0,46		4,6

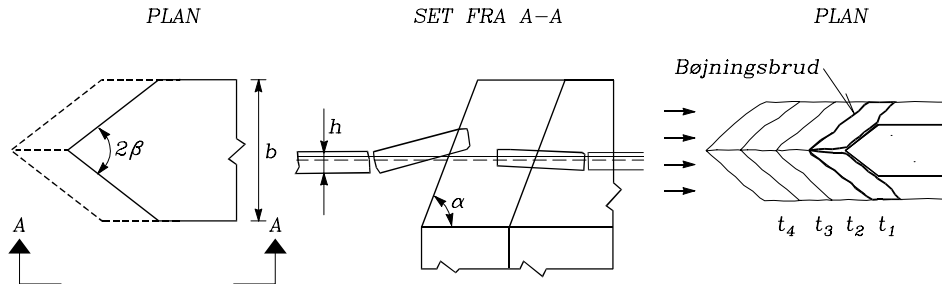
De store forskelle i resultaterne er ret typiske og maner til stor forsigtighed mht. anvendelse af formler. Ralstons formel anbefales for smalle koniske konstruktioner.

3.2.2 Brede koniske konstruktioner

Når konstruktionsbredden hindrer isen i at undvige sideværts forbi konstruktionen betragtes konstruktionen som værende *bred*. Isophobningen foran konstruktionen forøger islasten, som det da anbefales at beregne ud fra formlerne for konstruktioner med lodret front, jf. kap. 3.1.

3.2.3 Kileformede konstruktioner med hældende front

Når isen presses forbi en kileformet konstruktion med skrå front, opstår i reglen bøjningsbrud som vist på fig. 3.4, idet den skrå næse løfter isen lokalt.



Figur 3.4. Geometri af skrå kileformet næse samt indikation af tidsmæssigt forløb af isens brudmønstre.

Isbrudlasten kan estimeres ud fra følgende formler:

Korzhavin (1962)

Korzhavin har til beregning af de maksimale horisontale og vertikale islaste udviklet følgende semiempiriske formler, som bl.a. er baseret på den noget konservative antagelse at *bøjningsbruddet* udvikler sig i afstanden $3h$ fra konstruktionsoverfladen.

$$F_{i,b}^H = C_0 \sigma_f b \cdot h \tan \alpha \quad (3.16)$$

$$F_{i,b}^V = C_0 \sigma_f b h (1 + \mu)^{-1} \quad (3.17)$$

hvor værdier af den empiriske koefficient C_0 er givet i tabel 3.1.

Tabel 3.1. Koefficienten C_0 i formel af Korzhavin (1962)

		2β				
		45°	60°	75°	90°	120°
α	45°	0,20	0,17	0,16	0,16	0,15
	60°	0,24	0,20	0,19	0,18	0,17
	70°	0,38	0,27	0,28	0,21	0,19
	75°	0,70	0,38	0,29	0,26	0,22

At C_0 -værdierne stiger med faldende β -værdier forklares ved, at en spidsere næse trænger længere ind i isflagen inden der fremkaldes brud, hvilket forøger størrelsen af de afbrækkede isstykker. Ved store α -værdier nærmer brudform og brudlast sig forholdene ved vertikale konstruktioner.

For udvikling af *forskydningsbrud* har Korzhavin angivet formlerne

$$F_{i,s}^H = (1 + \mu) k \tau b h \tan \alpha \sin \beta^{-1} \quad (3.18)$$

$$F_{i,P}^V = k \tau b h \sin \beta^{-1} \quad (3.19)$$

For konstruktioner med halvcirkulær front ændres formlerne til

$$F_{i,s}^H = 0,5 \pi (1 + \mu) k \tau b h \tan \alpha \quad (3.20)$$

$$F_{i,s}^V = 0,5 \pi k \tau b h \quad (3.21)$$

τ er isens forskydningsstyrke, k er kontaktkoefficient som er 1, når der er fuld kontakt imellem is og konstruktion og ca. 0,5 når der er dårlig kontakt, jf. også k -værdier angivet for (??).

$\tau = 0,4 - 1,0$ MPa for fersk flod- og søis og svarer i øvrigt til halvdelen af trykstyrken, hvis Tresca-flydekriteriet lægges til grund.

Tryde (1975)

Trydes formel er baseret på et skønnet bøjningsbrudmønster.

Den maksimale horisontale islast er givet ved

$$F_{i,b}^H = 5,2 \cdot (\sigma_f / \sigma)^{0,33} \cdot C^{-0,5} \cdot \sigma \cdot b \cdot h \quad \text{gældende for} \quad (3.22)$$

$$3,3 < b/h < 20$$

hvor

$$\begin{aligned} C &= 0,16 E^{0,5} (\rho_i V^2 \sin^2 \beta)^{-0,5} C_1 \cdot C_2^{-1} C_3^2 \\ C_1 &= 1 - \mu (\tan \alpha / \sin \beta) \\ C_2 &= \mu + (\tan \alpha / \sin \beta) \\ C_3 &= 6 (h/b) \cos \beta + 6 (C_1 / C_2) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Eksempel:

Beregn horisontal og vertikal islast på en kileformet konstruktion med følgende geometri: $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $b = 5,0 \text{ m}$, $\sigma = 1,5 \text{ MPa}$, $\sigma_f = 0,5 \text{ MPa}$, $\tau = 0,75 \text{ MPa}$, $\mu = 0,15$, $E = 6,0 \text{ GPa}$, $h = 0,60 \text{ m}$, $\rho_i = 910 \text{ kg/m}^3$, $k = 0,6$.

Formel	$F_{i,b}^H$ (MN)	$F_{i,b}^V$ (MN)	$F_{i,P}^H$ (MN)	$F_{i,P}^V$ (MN)
Korzhavin (1962)	0,52	0,26	5,4	2,7
Tryde (1975)	0,91			

Da de beregnede værdier for forskydningsbrud er væsentligt større end for bøjningsbrud, er det sandsynligt, at forskydningsbrud udvikles.

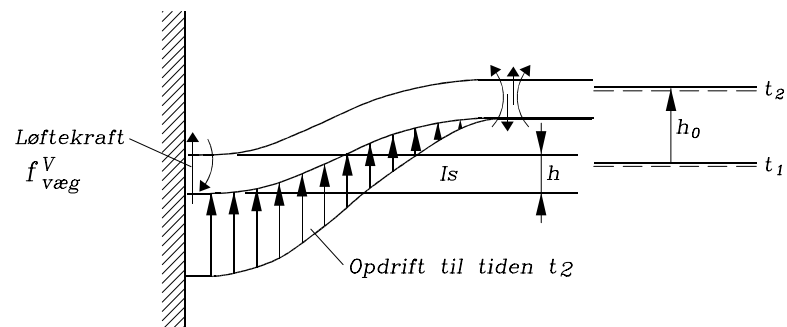
*3.2. ISBRUDLAST FRA ISFLAGER OG ISDÆKKE PÅ KONSTRUKTIONER MED
SKRÅ FRONT*

Kapitel 4

Isløftekræfter på pæle og vægge

4.1 Isløftekraft på lang lodret væg

Når der er roligt vand, fryser isen i reglen fast til faste begrænsninger. En stigning i vandspejlet medfører en opadrettet kraft dels hidrørende fra deformationsmodstanden i isen, dels hidrørende fra forøgede opdriftskræfter, jf. fig. 4.1.



Figur 4.1. Illustration af isløftekraft på væg.

Ved et tilsvarende fald i vandstanden opstår en nedadrettet kraft, som dog er mindre end den opadrettede, idet opdriftsbidraget forsvinder.

Overstiger løftekraften adhæsionskraften løsner isen sig fra væggen, ligesom isen bryder, såfremt isens brud- eller flydespænding nås. En teoretisk beregning af løftekræfterne er meget usikker grundet isens komplicerede elastisk-plastiske egenskaber. Ved meget langsomme vandstandsvariationer genereres kun små spændinger i isen pga. krybning.

Hvor der er et betydeligt tidevand, fryser isdækket sjældent fast til konstruktioner, men der dannes på konstruktionen en *isfod*, som rager lidt ud. Isflager kan dog ved lavvande blive skubbet ind under isfoden og derved frembringe løftekræfter ved stigende vandstand. Disse kræfter er dog i reglen af beskeden størrelse.

I DS 410 angives, at den lodrette opadrettede islast hidrørende fra en vandstandshævning, der påvirker en lang, lodret væg regnes ensformigt fordelt og bestemmes af

$$f_{væg}^V = 0,4 \cdot h (K_0 \sigma_f h_0)^{0,5} \text{ kN/m} \quad \psi = 0 \quad (4.1)$$

hvor

- K_0 er 9,81 kN/m³
- σ_f er isens karakteristiske bøjningsstyrke i kN/m²
- h_0 er vandstandshævningen i m.

4.2 Isløftekræfter på pæle og mindre konstruktioner

Pæle er ofte udsat for store og gentagne isløftekræfter. Især for fortøjningspæle og pælebroer i lystbådehavne volder isløftekræfter problemer. Når isen er frosset fast til pælen og vandet herefter stiger, vil isen deformeres som en skål rundt om pælen, og dette vil medføre, at isen søger at løfte pælen ud af bunden, jf. fig. 2.2.h og fig. 4.1. Herefter sker det i reglen, at pælen smelter sig fri i en tøperiode, hvorefter den senere atter fryser fast, og en ny optrækning kan finde sted. Isen har dog også en tendens til selv i frostperioder at brække løs fra pælen og følge med ned ved faldende vandstand. Denne cyklus kan gentage sig mange gange og vil resultere i, at en pæl, eventuelt med brooverbygning, kan blive hævet flere meter. Afstivningskryds imellem bropæle er selvsagt særligt sårbare over for isløftekræfter. Nedadrettede iskræfter på pæle er af størrelsesordenen halvdelen af de opadrettede kræfter.

I DS 410 angives, at den lodrette opadrettede islast for pæle og mindre konstruktioner bestemmes af

$$F_{pæl}^V = 0,8 \sigma_f e^{1,75} b^{0,25} \quad , \quad 0,5 \leq \frac{b}{e} \leq 7 \quad , \quad \psi = 0 \quad (4.2)$$

hvor b er konstruktionens bredde i vandlinien, dvs. for cirkulære pæle lig med diameteren. σ_f er isens karakteristiske bøjningsstyrke.

For konstruktioner med $b/e > 7$ skal man anvende (4.1) til bestemmelse af totallasten

$$F^V = \pi \cdot b \cdot f_{væg}^V \quad \psi = 0 \quad (4.3)$$

Kapitel 5

Referencer

- Schwerdtfeger (1963) *The Thermal Properties of Sea Ice*. Journal of Glaciology, Vol. 4, No. 36, pp. 789-807.
- Frankenstein, G. and R. Garner (1967) *Linear relationship of brine volume and temperature from -0.5 to -22.9°C for sea ice*. Journal of Glaciology 6, No. 48, pp. 943-945.
- Nadreau, J.P. and B. Michel (1984) *Ice Properties in relation to Ice Forces*. Proc. 7'th Int. Assoc. of Hydr. Res. (IAHR) Ice Symposium, Vol.4, pp. 63-115, Hamburg, West Germany.
- Weeks, W. and A. Assur (1967) *The mechanical properties of sea ice*. Cold Regions Science and Engineering Monograph 11-C3, U.S. Army, 80 p.
- Christensen, F.T. (1989) *Determination of Extreme Ice Forces*. Notes for a Short-course at University of Salford, England, 19-21 April 1989.
- Christensen et al. (1989a) *Design of Great Belt Western Bridge for Ice Forces*. Proc. 8'th Int. Conf. on Offshore and Arctic Engineering (OMAE-89) Vol. 4, pp. 365-376, the Hague, the Netherlands.
- Christensen, F.T. and J. Skourup (1990) *Extreme Ice Properties*. Journal of Cold Regions Engineering, Vol.5 ,No. 2, June 1991, pp.51-68.
- Peyton, H.R. (1966) *Sea ice strength*. Univ. of Alaska, Geophysical Institute, Report No. UAG-R 182, 285 p.
- Assur, A. (1958) *Composition of sea ice and its tensile strength in Arctic sea ice*. U.S. Nat. Acad. Sciences, N.R.C. Pub. 598, p. 106-138.
- Mellor, M. and D.M. Cole (1982) *Deformation and failure of ice under constant stress or constant strain*. Cold Regions Science and Technology, Vol. 5, No. 3, pp. 201-219.
- Määttänen, M.P. (1975) *Experiences of Ice Forces Against a Steel Lighthouse Mounted on the Seabed, and Proposed Constructional Refinements*. Proc. of the Third Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions POAC, Fairbanks 1975.

- Danys, J.V. (1977) *On wind induced static ice forces on offshore structures*. Proc. POAC '77, St. John's, New Foundland.
- Michel, B. (1970) *Ice Pressure on Engineering Structures*. CRREL Monograph 111 B 1 b. Hanover, NH, U.S.A.
- Michel, B. (1978) *Ice Mechanics*. Les Presses de L'université Laval, Québec, 1978.
- Carstens, T., editor (1980) *Working Group on Ice Forces: A State-of-the-Art Report* (Prep. by IAHR Section on Ice Problems), U.S. Army Corps of Engineers, Special Report 80-26.

